



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

工學碩士 學位論文

심대 양극 설치방법에 의한 음극방식
시스템의 성능 개선에 관한 연구

A study on the performance improvement of cathodic protection
system by deepwell anode installation method



2014年 2月

韓國海洋大學校 産業大學院

機 關 시스템 工 學 科

秋 淵 吉

本 論文을 秋淵吉의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長	工學博士	李 明 勳	印
委 員	工學博士	尹 龍 燮	印
委 員	工學博士	鄭 珍 阿	印

2013年 12月 11日

韓國海洋大學校 産業大學院

목 차

Abstract

제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 내용	2
제 2 장 이론적 배경	4
2.1. 부식 및 방식의 개요	4
2.1.1 부식의 개요	4
2.1.2 방식의 개요	6
2.1.3 부식 및 방식의 중요성	6
2.2 부식방식의 원리	7
2.2.1 산화·환원반응	8
2.2.2 부식과정	9
2.2.3 부식 발생조건	10
2.3 음극방식법	11
2.3.1 피복강관의 방식원리	11
2.3.2 희생양극법	14
2.3.3 외부전원법	16
2.3.4 외부전원법과 희생양극법 비교	17
2.4 심매법과 천매법	18
2.4.1 심매법	18
2.4.2 천매법	18
2.4.3 심매법과 천매법 비교	20
2.5 전기방식 기준	21
2.5.1 - 850[mV/CSE] 전위 기준	21
2.5.2 - 850[mV/CSE] 분극전위 기준	23
2.5.3 100[mV] 분극전위 변화 기준	24

제 3 장 실험방법	27
3.1 수치해석	27
3.1.1 양극을 배관과 수평으로 설치	27
3.1.2 양극을 배관과 수직으로 설치	28
3.2 현장실험	28
3.2.1 양극을 배관과 수평으로 설치	28
3.2.2 양극을 배관과 수직으로 설치	30
제 4 장 실험결과	31
4.1 수평 배치 시 방식전위 분석	31
4.1.1 수치해석(모델링 평가)	31
4.1.2 현장실험결과	40
4.2 수직 배치 시 방식전위 분석	47
4.2.1 수치해석(모델링 평가)	47
4.2.2 현장실험결과	47
4.2.3 수평/수직 비교평가	54
4.3 양극 홀(hole) 간격에 대한 고찰	56
4.3.1 이론적 고찰	56
4.3.2 현장실험(이론식 비교분석)	61
제 5 장 결론	62
참고문헌	63

A study on the performance improvement of cathodic protection system by deepwell anode installation method

YEON-GIL CHOO

Department of Marine System Engineering
Korea Maritime University Graduate School of Industry

Abstract

According to overseas papers, the economic injury caused by corrosion is 3 ~5% of GNP. As Korean industrial structure has highly depended on heavy and chemical industry, the economic injury is supposed to 4~5% of its GNP. So far, we didn't spend much time to be concentrated on corrosion, even if it is very important in many fields. So that, this paper analyzes many factors which lead to corrosion with regard to corrosion circumstance of underground pipeline

This study is intended to examine the theoretical background on the corrosion and protection principle of underground steel pipeline, and is intended to enhance the economic feasibility and efficiency of cathodic protection through comparison, analysis, and verification of numerical analysis results and on-site experiment results by carrying out numerical analysis through exclusive cathodic protection system program in order to investigate proper separation distance between anode holes etc. in case of installing many anodes at the same time, in case of remote anode bed and close anode bed, and in case of installing anode horizontally to and

vertically to the protected structure (buried steel pipeline), and by carrying out the real field experiment of underground piping in the similar condition.

The summary of study results is as follows.

- (1) In case distance between holes is close, efficiency lowers due to mutual interference with many anode holes, therefore it is necessary to maintain comparatively uniform electric potential by keeping anode holes at intervals of 25 m or over.
- (2) It was verified that the distribution of protection potentials was more uniform as separation distance from piping was increased in case of vertically burying anode. And protection with separation of at least 40 m was effective.
- (3) According to the results of comparing the cases of vertically and horizontally burying 3 anode holes, the efficiency of protection system could be increased as anode was installed vertically to the piping or the separation distance from the piping was increased.
- (4) In case of installing many anode holes, if intervals between holes are narrow, output ampere was decreased because of mutual interference. And as quantity of anode holes was increased, efficiency was decreased. Therefore, it was economical and efficient to keep anode holes at intervals of at least 30 m, and to install 3 holes or below, if possible.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

전기방식이란 기술적으로 음극방식을 의미하며, 이는 구조물의 전위를 인위적으로 조절하여 부식반응인 양극반응을 억제하는 방법이다. 다시 말해서 자연전위 혹은 그 이상의 전위에서 부식이 진행되고 있는 구조물에 인위적으로 전류를 가하여 전위를 낮추어 음극(cathode)화 함으로써 부식반응인 양극반응을 억제하는 것이다.

우리나라는 상수도 지중 매설관로 중 미방식으로 인한 부식의 위험이 있는 도복장 강관을 대상으로 방식설비를 주로 설치한다^[1]. 상수도관은 관경이 크고 방식대상 표면적이 넓어 관 제조 시 핀홀(pinhole)과 같은 미세한 피복결함과 운송 및 매설시 상호간의 충격이나 굽힘, 용접으로 인한 손상발생, 매설 후 경년변화에 의한 도장의 열화발생, 외부로부터의 충격 등으로 피복이 손상되어 방식소요전류가 많이 요구된다. 방식대상 시설의 전기방식법은 방식전류에 대한 작용매개체의 차이에 의해 크게 외부전원법과 희생양극법으로 분류된다^[2].

외부전원법(impressed current cathodic protection, ICCP)은 방식전류를 외부 전원장치로부터 강제로 공급하는 시스템으로서 직류의 (+)측을 불용성양극에 연결하고 강관(steel pipeline)을 (-)측에 연결하여 강관에 전자(Electron)를 공급하여 부식을 방지하는 방법이며, 희생양극법(sacrificial anode cathodic protection, SACP)은 강관보다 더욱 부식성이 강한 금속(Zn, Al 등)을 연결하여 방식전류를 공급하는 방법이다.

외부전원법은 양극의 설치방법에 따라 심매법(deepwell bed method)과 천매법(shallow bed method)으로 구분되며, 심매법은 지표면에서 수직으로 보링(boring)을 한 후 홀 내부에 양극을 설치하는 방식으로 약 15 m ~ 80 m 정도의 깊이에 양극을 설치한다. 이 방법은 양극이 차지하는 면적이 작기 때문에 양극부지로 활용할 수 있는 유효 토지가 거의 없는 상황에서 많이 사용되고 있다^[1].

전기방식에서 가장 중요한 것은 방식전류밀도의 균일분포(uniform distribution)를 확보하는 것이다. 이를 위해서는 양극을 배관으로부터 원거리로 이격시켜서 매설하는 리모트 그라운드 베드(remote ground bed)가 중요하다. 리모트 그라운드

베드로 양극을 설치하면 배관으로 유입되는 양극 전류량이 양극과의 거리에 관계 없이 일정하게 분배되어 배관의 전위를 균일하게 분포할 수 있다. **Fig. 1.1**은 리모트 그라운드 베드의 중요성을 나타내는 개념도이다.

Fig. 1.1 (a)는 양극과 마주보고 있는 배관 표면에서의 전류는 옴의 법칙($I = R/V$)에 따라 전류($I_1 = R_1/V$)와 반대쪽 표면에서의 전류($I_4 = R_4/V$) 비는 두 지점에서의 전류경로에 대한 저항 비(R_4/R_1)에 비례하므로 양극과 배관의 거리가 너무 가까울 경우 양극과 반대쪽에 위치한 배관은 전류분포가 불균일하게 된다. 반면 **Fig. 1.1 (b)**와 같이 양극을 배관으로부터 조금 더 멀리 이격하게 된다면 상대적으로 전류경로의 길이 및 이로 인한 저항은 좀 더 비슷한 값을 가지게 된다. 즉, 양극이 설치되는 지점(ground bed)과 피방식체 간의 이격 거리를 충분하게 확보하면 균일한 전류분포를 얻을 수가 있어 과방식에 대한 문제 해결은 물론 방식 범위를 확대할 수 있다.

하지만, 한정된 부지 내에서 리모트 그라운드 베드를 통한 균일전류분포를 얻기에는 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 피방식체와 그라운드 베드간 이격 거리가 방식에 미치는 영향과 그라운드 베드(양극) 배치 방법에 따라 전류분포도를 측정하여 효율적이고 경제적인 양극설치 방법에 대하여 연구하는데 그 목적을 두고 있다.

1.2 연구 내용

본 연구는 지하 매설 강관의 부식과 방식의 원리에 대한 이론적 배경을 알아보고, 음극방식 전용 프로그램을 통한 수치해석과 유사조건의 현장실험을 통하여 외부전원법에 적용하는 불용성 양극을 피방식체와 수평으로 설치할 때와 수직으로 설치할 때, 집중 배치할 때와 분산배치 할 때, 여러 개의 양극을 동시에 설치할 때의 음극방식 성능과 효과에 대하여 연구하였으며, 양극의 여러 가지 설치 방법에 대한 양극 홀 간의 적정 이격 거리등에 대하여 고찰하고자 하였다.

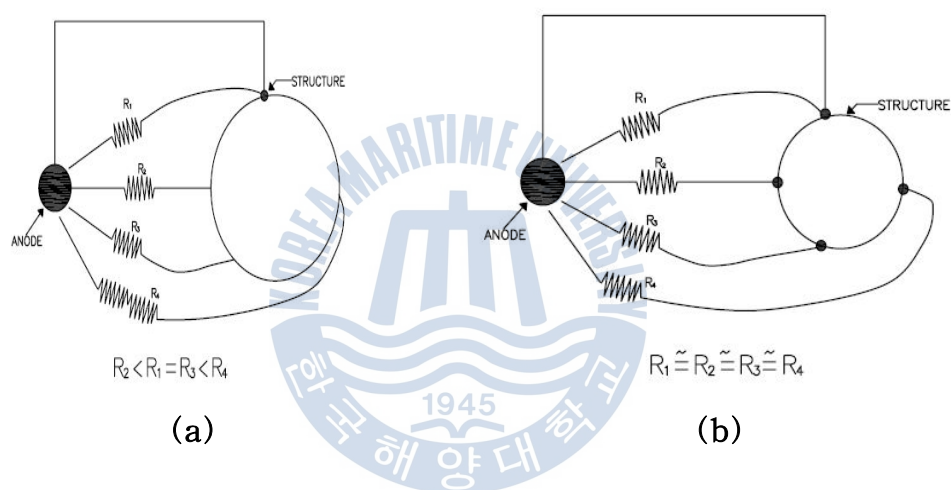


Fig. 1.1 The conceptual diagram of pipeline current distribution according to remote ground bed

제 2 장 이론적 배경

2.1 부식 및 방식의 개요

2.1.1 부식의 개요

부식은 우리 일상생활 주변에서 항상 관찰되고 있다. 자동차의 차체나 머플러에 발생하는 녹 홀(rust hole), 상하수도는 물론 가스 배관의 부식에 의한 공공주택의 적수/누수 현상이나 가스 누출, 식기 등에 발생하는 녹뿐만 아니라, 석유화학 공장이나 발전소 등의 산업현장에서는 부식방지를 위해 값비싼 재료는 물론 값 비싼 수처리 시스템을 도입하고 있다. 최근에 관심이 증대되고 있는 대형 건물이나 교량 등의 안전성 역시 부식과 밀접한 관련이 있는 문제이다.

Fig. 2.1은 광석과 금속 재료와의 열역학적 상관관계를 나타내고 있다. 광석부식(corrosion, 腐蝕)이란 금속재료(metallic materials)가 그 주변 환경과의 사이에서 화학적 혹은 전기화학적(electrochemical)으로 반응하는 과정이다.

그러나 좁은 의미에서의 부식이란 금속재료가 사용 환경 속에서 퇴화(degradation process)되어 본래의 기능을 상실하게 되는 것을 의미한다. 이러한 금속의 부식은 자발적인 현상(spontaneous process)으로서 금속이나 합금이 그것이 생산되어진 광석(ore)의 상태로 회귀하려고 하는 과정으로 이해할 수 있다. 금속은 자연계에서 대부분 산화물이나 유화물 등의 형태로 존재하고 있다. 우리는 이것을 환원(reduction)이라는 과정을 통하여 유용한 금속(높은 에너지 상태)을 얻어서 각종 용도에 활용하고 있다. 다시 말해서 자연 상태로 존재하는 광석에 제련이라는 형태로 에너지를 주입하여 금속을 생산하게 되는데, 에너지가 주입되어 불안정한(unstable) 금속이 자연 상태의 안정한(stable) 화합물 상태로 되는 것이 에너지 면에서 안정하기 때문에 금속재료는 주위에 존재하는 다른 원소와 결합하여 화합물 (광석)의 상태로 회귀하려고 하는 과정을 부식이라고 이해할 수 있다.

따라서 부식은 자발적인 현상으로서 모든 금속은 반드시 부식이라는 퇴화과정을 겪게 된다고 할 수 있는 것이다.

금속의 부식경향은 예측할 수 있으며, 따라서 불안정도가 높은 금속은 쉽게 부식 된다는 것을 알 수 있다. 제련과정에서 많은 양의 에너지가 투입된 금속은 불안정하여 부식되려는(에너지를 버리고 자연 상태로 회귀하려는) 경향이 크고,

반면에 제련이 용이한 금속은 부식되려는 경향이 작다고 할 수 있다. 예를 들어 구리나 구리 합금 등은 철이나 강에 비해 제련에 필요한 에너지가 훨씬 적으므로 부식에 대한 저항성이 크다. 자연 상태에서도 금속의 형태로 존재하는 금(gold)이 부식되지 않는 것도 이러한 이유이다.

이상에서 설명한 금속의 정확한 부식경향은 전위로 수치화하여 표시할 수 있다. 부식현상을 조금 더 이해하고 부식관련 문헌들을 읽고서 응용할 수 있기 위해서는 금속의 부식이 전기화학적인 반응(electrochemical reaction)의 결과임을 이해하여야만 한다. 모든 부식현상은 전기화학적 반응에 의해 진행되는데, 전기화학적 반응이란 화학반응의 진행과정에 전자(electron)가 참여하는 반응이다.

이러한 반응은 반드시 두 개의 반쪽반응(half reaction)으로 이루어지게 된다. 예를 들어 산성 용액에서 철이 부식되는 경우는 다음과 같은 두 개의 반쪽반응에 의해 진행된다.



위의 반응에서 식(1.1)은 철의 산화반응 혹은 양극반응(anodic reaction)이라고 하며 식(1.2)를 수소이온 환원반응 혹은 음극반응(cathodic reaction)이라고 한다.

양극반응은 전자가 생성되는 반응이고, 환원반응은 전자가 소모되는 반응으로 이해할 수 있다. 부식이 진행되고 있는 철의 표면에서는 식(1.1)과 식(1.2)의 두 가지 반응이 모두 일어나고 있는 것이다. 또한 철은 식(1.1)의 반응에 의해 Fe^{2+} 의 형태로 소실되며 이 반응에서 생성되는 전자는 식(1.2)의 반응에 의해 소모된다. 부식원인을 이해하고 적절한 부식방지 대책을 제시하기 위해서는 이 두 가지 반응에 대한 확실한 이해가 필요하다. 음극반응에는 식(1.2)와 같은 수소이온의 환원 반응 뿐만 아니라 산소환원, 금속이온 환원 등의 반응이 있다.

금속의 부식경향은 양극반응이 어느 정도 용이하게 발생할 수 있는가 하는 문제인데, 이러한 반응의 용이성은 전기화학적 개념인 전위(potential)로서 표현된다. 지하 매설된 배관의 부식 여부를 진단하기 위해 테스트 박스를 통한 전위측정을 한다. 단지 전위가 낮은 금속은 전위가 높은 금속과 비교할 때 부식경향이 높다는(양극반응이 용이하게 발생한다는) 점을 이해하여야 한다.

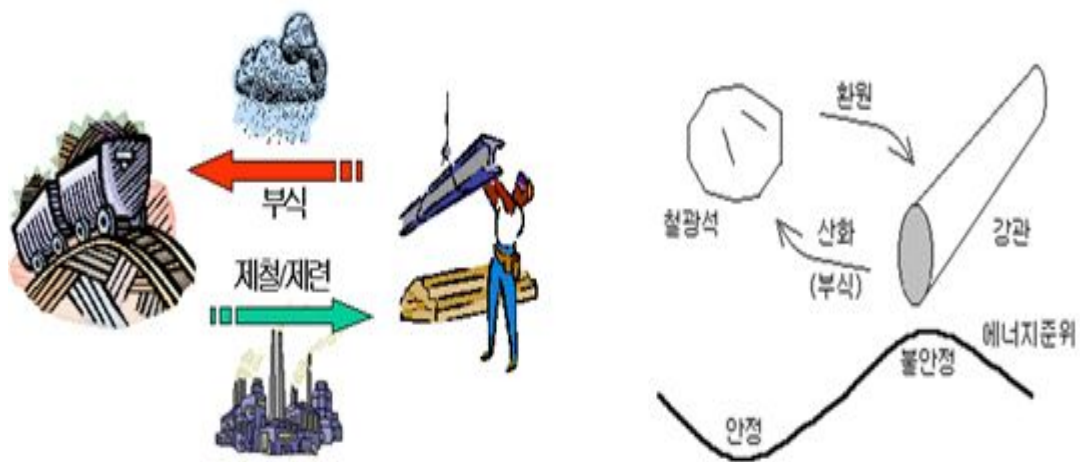


Fig. 2.1 The thermodynamic correlation between or and metallic materials

2.1.2 방식의 개요

방식(防蝕)이란 간단히 부식현상을 방지하는 것이라고 할 수 있으나, 실제적 의미에서는 부식현상을 억제하는 것일 뿐, 완벽하게 부식을 방지하는 방법은 없다고 해도 과언은 아니다. 실제 우리가 많이 시행하고 있는 전기방식의 경우에도 방식 전위 범위에서는 방식이 이루어지고 있다고 말하고 있으나, 100% 완벽하게 철배관의 산화되는 속도를 방지한다는 것 보다는 99.99%로 산화속도를 억제하고 있는 것이라고 할 수 있다. 즉 강제적으로 외부에서 에너지를 사용하여 그 속도가 미미하도록 유지하고 있을 뿐이다. 따라서 부식을 억제하기 위해서는 부식 현상을 먼저 정확히 이해해야 한다. 왜냐하면 대부분의 실용적인 방식법이라는 것은 모두 부식 발생의 원인 및 발생과정(기구) 등의 이해로부터 도출되었기 때문이다.

2.1.3 부식 및 방식의 중요성

부식 현상은 각종 사회 간접자본 구조물(structure)뿐만 아니라 산업설비 핵심 부품들의 수명 및 내구성 감소를 일으킴으로써 경제적인 손실, 인적 자원의 손실 및 지구자원의 고갈(depletion)을 가져오는 결과를 초래하고 있다. 1975년에 미국의 NBS(국립표준국)와 Battelle Columbus 연구소가 공동으로 조사한 바에 의하면

부식에 의한 경제적 손실의 규모는 약 \$700 억 정도로서 그 해 미국 GNP 의 4.2 %에 달한다. 5 년 후에 실시된 비슷한 조사에서도 부식에 의한 경제적 손실 은 80~1260 억 \$로 추정되고 있으며 (J. H. Payer et al, Materials Performance, May-Nov. 1980) 우리나라의 경우에는 아직까지 이러한 조사가 시행된 바가 없어서 부식에 의한 경제적 손실규모를 추정할 수는 없으나, 중화학공업의 비중이 높은 산업구조를 감안해 볼 때 GNP의 4~5 % 에 달하는 손실이 있을 것으로 추정 된다.

이상에서 설명한 경제적 손실은 직. 간접적 손실을 모두 포함하는 것이다. 여기서 직접적 손실은 부식된 설비나 기계장치의 교환에 소요되는 비용을 말하며, 간접적 손실은 플랜트의 조업 중단에 따른 손실이나, 용기류나 파이프의 부식에 따른 제품의 손실이나 오염, 설비의 성능 저하 및 부식율을 고려한 과중한 설계 등을 포함하고 있다.

이러한 경제적 손실보다 더욱 중요한 것은 안전성에 대한 것이다. 일반 산업현 장에서는 부식에 의한 설비나 구조물의 안전성에 대해 끊임없는 문제가 제기되고 있다. 미국의 경우에는 1967년 WV(West Virginia)주 Pt. Pleasant의 교량 붕괴, 1973년 WV주 Charleston과 1986년 MN(Minnesota) 주의 가스배관 사고, 1981 년 LA 주 Natchitoches 에서 발생한 가스배관 균열·폭발 사고, 1987 년 VA 주 원자 력 발전소의 증기발생 장치폭발 1988년 Hawaii 에서의 비행기 사고 등이 발생했으 며, 우리나라의 경우에도 교량이나 신도시 아파트, 지하 매설관 등의 안전성이 최 근 문제시되고 있다.

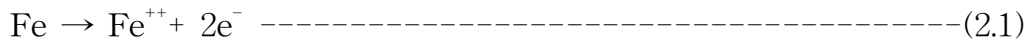
또 부식을 방지하기 위한 노력은 이들의 물질적 손실이나 안전 이외에 환경적 인 측면이 있다. 소극적 의미에서 부식상태의 방치는 결국 부존자원의 낭비를 초 래할 것이라는 것과 적극적인 의미에서 만약 설비가 부식으로 인하여 관련 공업 적 유해 물질이 누출된다면 자연환경을 크게 훼손할 수 있다는 것이다. 특히 물질 문명의 현대사회에서 이러한 폐해의 예방노력은 각별히 부각되고 있으며, 경제적 부를 축적한 국가일수록 이에 대한 노력이 가중되고 있다고 할 수 있다.

부식은 이와 같이 중요한 문제이며 적극적인 대처를 필요로 한다. 앞에서 설명 하였듯이 부식은 자발적인 현상이나, 부식을 방지하기 위한 다양한 방식기술들이 사용되고 있다^[4].

2.2 부식방식의 원리

2.2.1 산화 · 환원반응

산화반응(Anodic reaction)은 식(2.1)의 양극반응으로서 전자를 잃게 되어 금속이 손실되며 부식이 발생하게 된다.



환원반응(Cathodic reaction)은 전자를 소모하는(consumption) 반응이며 전하를 중성으로 만들기 위해 산화반응에서 나온 전자를 소비하는 작용을 하며 부식이 진행되기 위해서는 양극반응에 의해 생성된 전자가 소모될 수 있는 음극반응이 수반된다.

또한, 양극반응이 금속의 산화반응인 것과는 달리, 음극반응은 부식 환경에 따라 다양한 반응이 발생하며 대표적인 음극반응은 식(2.2), 식(2.3)의 수소발생 반응과 식(2.4), 식(2.5)의 산소환원 반응 및 식(2.6)의 금속이온의 환원반응이 있다. **Fig. 2.2**는 금속 M에 대한 도식적 모형이다.

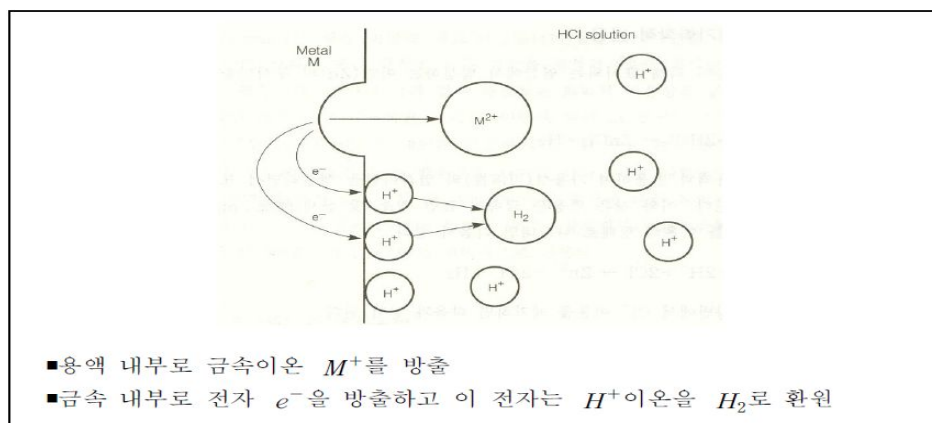
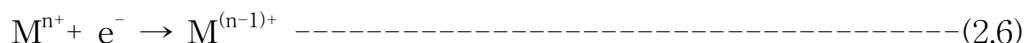
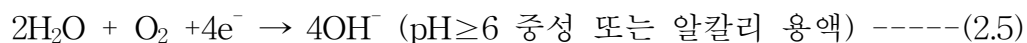
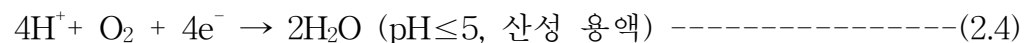
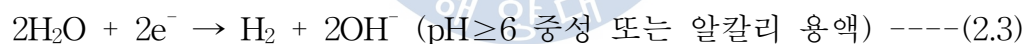


Fig. 2.2 The diagrammatic model about Metal M

2.2.2 부식과정

앞에서 부식을 환경과의 상호작용에 의한 금속의 퇴화라고 정의하였는데, 이러한 상호작용은 전기적 전하(charge)의 이동이 수반되는 전기화학적(electrochemical) 관점에서 이해할 수 있다. 부식을 이처럼 전기화학적 과정으로서 이해하기 시작한 것은 1815년에 Wollaston이 제안한 이래로 부식이 발생하는 원인은 물론 그 방지 방법들을 이해하는데 필수적인 것이 되었다.

부식의 전기화학적 특징을 이해하기 위하여 염산용액에서 아연이 부식되는 과정을 예로써 설명해 보고자 한다. 염산용액 속에서 아연은 거품을 발생하면서 녹는 것을 볼 수 있는데, 이 때 아연(Zn)은 식(2.7)과 같이 가용성의 ZnCl_2 로 되고 표면에서는 수소 거품이 발생하는 것이다. 그런데 이 반응을 전하의 전달이 수반되는 전기화학적 과정으로 설명하기 위해서는 두 개의 반응으로 나누게 된다. 위와 같은 전체적인 화학반응은 다음과 같은 양극부위에서의 반응(anodic reaction)과 음극 부위에서의 반응(cathodic reaction)으로 나누어 생각해볼 수 있다. **Fig. 2.3**은 전해질 내 금속의 전기화학적 부식 모형이다.



양극반응은 금속이 산화(oxidation)되는 반응으로서 전자를 생성시키는 반응이며, 음극반응은 환원(reduction)반응으로서 양극반응에 의해 생성된 전자를 소모하는 반응이다. 이 두 개의 반응은 아연금속 표면에서 동시에 그리고 반드시 같은 속도로 발생한다.

부식이란 위에서 말한 양극반응의 결과라고 할 수 있다. 부식이 진행되기 위해서는 양극반응에 의해 생성된 전자가 소모될 수 있는 음극반응이 있어야 한다. 양극반응이 모두 금속의 산화반응인 것과는 달리, 음극반응은 부식 환경에 따라 다양한 반응이 가능하다. 대표적인 음극반응에는 수소발생 및 산소환원반응이 있으며, 이외에도 금속이온의 환원반응도 있다.

실제 부식 환경에서는 한 가지 이상의 음극반응이 발생할 수도 있으며, 이 경우에는 부식속도가 증가하게 된다.

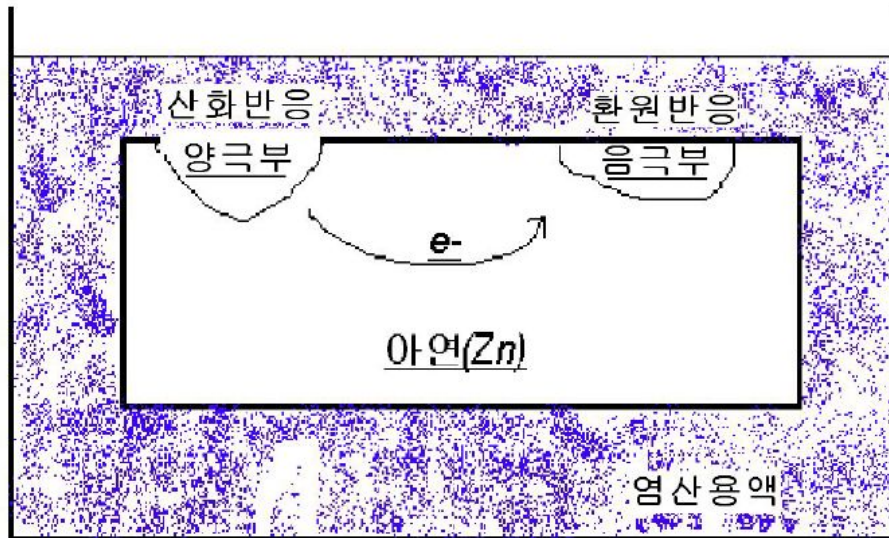


Fig. 2.3 Electrochemical corrosion of metal in electrolyte

2.2.3 부식 발생 조건

부식이 발생하기 위해서는 다음의 다섯 가지의 조건이 반드시 만족되어야만 한다.

첫째로, 양극(Anode)이 있어야 한다.

둘째로, 음극(Cathode)이 있어야 한다.

셋째로, 금속이라는 도선역할의 전자전도체(electronic conductor)가 존재하여야 한다. 이것은 전자가 생성되고 소모되는 반응부위들 사이에 전자의 흐름이 가능한 전도체가 있어야 한다는 것이다.

넷째로, 금속 주변에 이온전도체(ionic conductor)가 존재하여야 한다.

앞에서 살펴본 바와 같이 두 가지 반응에는 모두 이온들이 참여하고 있는데, 이러한 이온의 전달이 가능한 매체가 있어야 한다는 것이다.

마지막으로, 전류의 흐름이 가능한 폐쇄회로(closed loop)가 구성되어야 한다. 이것은 전자전도체와 이온전도체 사이에 전류 흐름 양상의 변환이 있어야 함을 의미하는 것으로서, 계면반응에 의한 전하전달 과정을 의미한다.

이상에서 열거한 요소들로부터 부식과정을 설명해 보기로 하자. 부식 환경에 놓인 금속은 특정한 부위에서 양극반응에 의해 금속이 용출된다. 금속의 용출은 금속의 이온화($M \rightarrow M^{n+} + ne^{-}$)를 의미하며 이 때 발생한 전자는 전자 전도체인 금속을 통하여 음극부위로 이동한다. 한편 용출된 금속이온은 이온 전도체인 용액을 통하

여 확산된다. 음극부위에 이른 전자는 용액 내에 존재 하는 수소 이온 또는 산소 등과 결합하는 음극반응을 일으킨다.

음극반응의 반응물(또는 생성물)에는 반드시 이온이 포함되어 있으며 이러한 이온들은 이온전도체를 통하여 공급(또는 제거)되어야 한다. 한편 금속과 용액의 계면에서는 전자가 이온으로 전환되는 전하전달 작용에 의하여 전기적인 폐쇄회로의 형성이 가능하게 된다.

위에서 언급한 다섯 가지 조건은 부식의 필요 충분 인자들로서 이 조건들이 갖추어지면 반드시 부식이 진행되며, 반대로 다섯 가지 조건 중 어느 하나만 결핍되어도 부식은 진행되지 않는다. 부식을 방지하기 위한 방식 방법을 생각할 때 부식반응인 양극반응을 억제할 수 있는 방안에만 집착하는 경향이 있으나, 이상에서 언급한 다섯 가지의 조건 중에서 어느 하나를 억제함으로써도 충분한 방식효과를 얻을 수 있다. Fig. 2.4는 부식이 발생하기 위한 다섯 가지 조건의 모형이다.

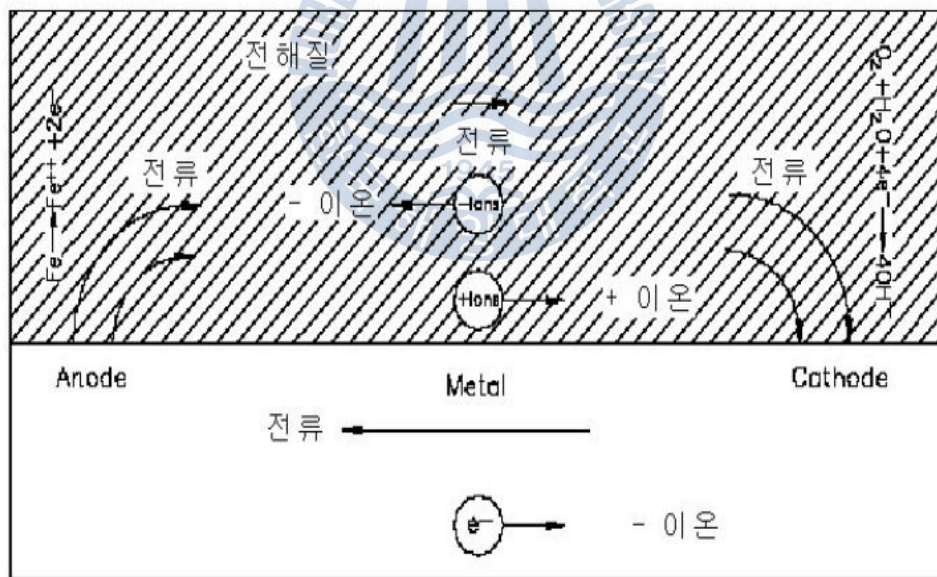


Fig. 2.4 Five conditions to cause corrosion

2.3 음극방식법

2.3.1 피복강관의 방식원리

전기방식(CP)은 금속을 전기화학적으로 음극화 함으로써 금속표면의 부식속도를 경감시키는 것이다.

배관 부식을 야기한 여러 환경에서 양극과 음극영역은 배관표면에 존재한다. 양극 영역에서는 전류가 배관에서 주위 전해질 (토양 또는 물)로 전류가 유출되며 배관은 부식된다.

이러한 양극 영역, 즉 배관 전체에 걸쳐 전류를 유입시켜 주면 전류는 전해질에서 강판으로 이동하게 되어 부식속도가 경감된다. 이와 같이 금속배관이 전류를 받아들이면 부식속도는 경감되는데, **Fig. 2.5**는 전기방식의 원리를 나타내었다^[3].

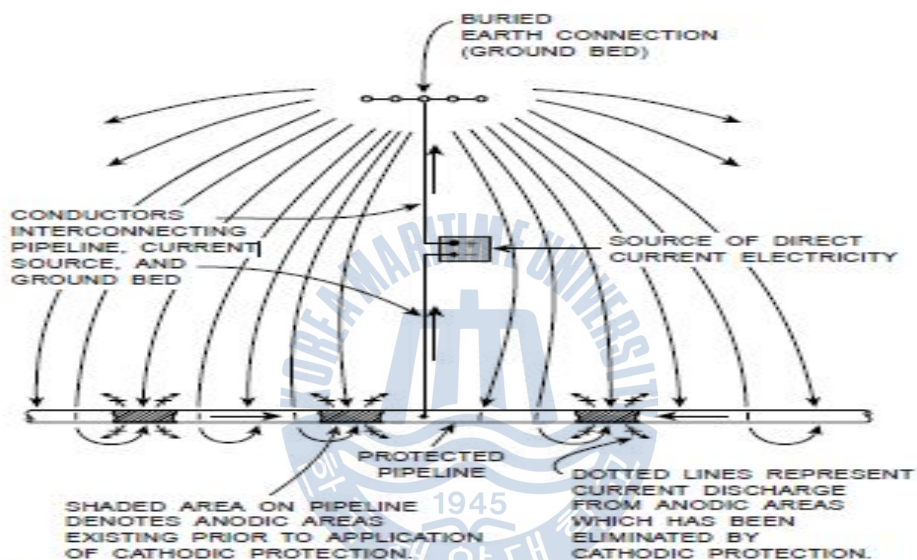


Fig. 2.5 The electrolytic protection principle

전기방식(CP)은 외부에서 인위적으로 전원을 인가함으로써 구조물의 산화전위를 낮추어 부식을 감소시키는 것이다.

전기방식의 원리는 **Fig. 2.6**의 Evans diagram 으로 설명할 수 있다. 즉, 전기방식 전류(i)를 인가함으로써 금속의 전위는 자유부식전위(E_{corr})에서 ECP로 바뀐다.

음극에 전류가 인가되면 전위가 (-)로 됨에 따라 부식속도는 감소한다. 여기서, 양극과 음극 부식속도는 전위를 유지하기 위해 인가되는 전류의 양이며 이 전류는 구조물에 인가되는 전기방식 전류의 값이 된다.

금속의 전위가 평형전위(E_{equil})에 이르기 전까지는 완전한 보호란 있을 수 없다. 평형전위(E_{equil})에서의 부식속도는 “0”이다. 완전한 보호를 위해서는 아주 많은 전

류량이 요구되므로(즉, 전위를 감소시키는 데 요구되는 전류량은 지속적으로 증가함) 실제적으로는 적용할 수 없다.

실제로 양극 타펠(Tafel) 경사는 일반적으로 100 mV 정도이므로 (-)방향으로 100 mV의 전위변화는 부식속도를 1/10 정도로 감소시킬 수 있다. 이 정도의 부식감소로도 대부분의 구조물은 충분히 보호될 수 있다. Fig. 2.7은 음극방식 전류량과 부식속도의 상관관계를 나타내었다.

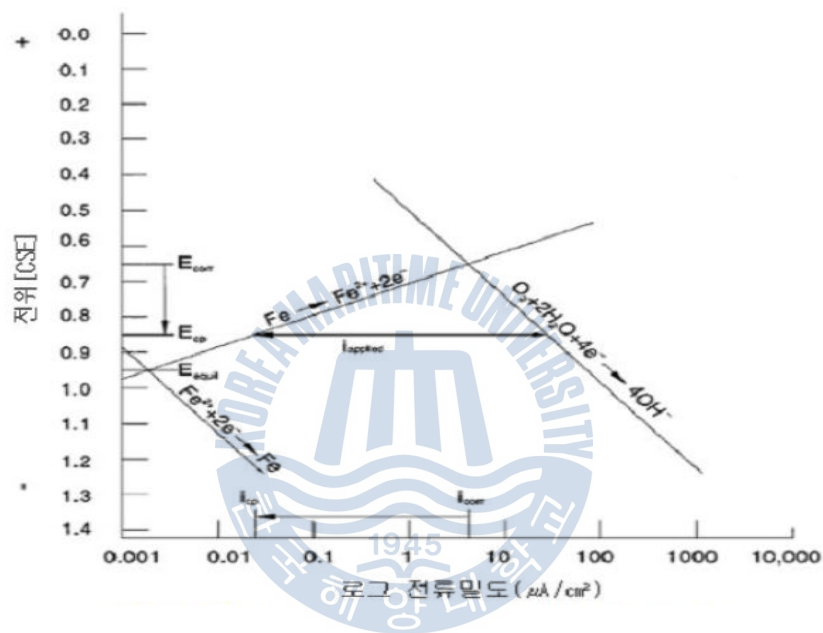


Fig. 2.6 Evans diagram

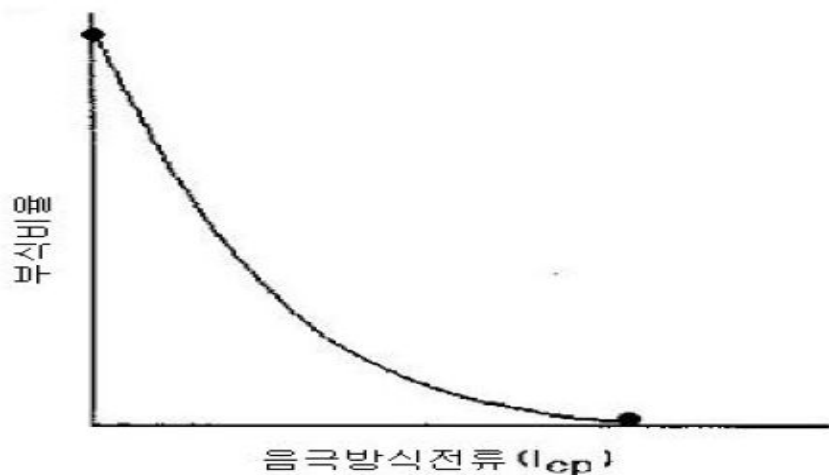


Fig. 2.7 The cathodic protection current quantity and the corrosion rate

2.3.2 희생양극법(sacrificial anode cathodic protection)

서로 다른 금속이 갈바닉 쌍을 이룰 경우 갈바닉 계열 상의 보다 귀한(양의 방향으로 높은) 전위의 금속은 보다 음분극이 되며 친한 전위의 금속은 양극용해가 잘 된다는 갈바닉 원리로부터 응용된 방법으로 방식대상이 되는 금속보다 친한(음의 방향으로 높은) 전위의 금속을 전기적으로 접속하여 음극방식의 원리를 얻어내는 방법이다. Fig. 2.8, Fig. 2.9는 희생양극 연결 시 부식 셀에서 전류의 흐름과 방식 사례다^[7].

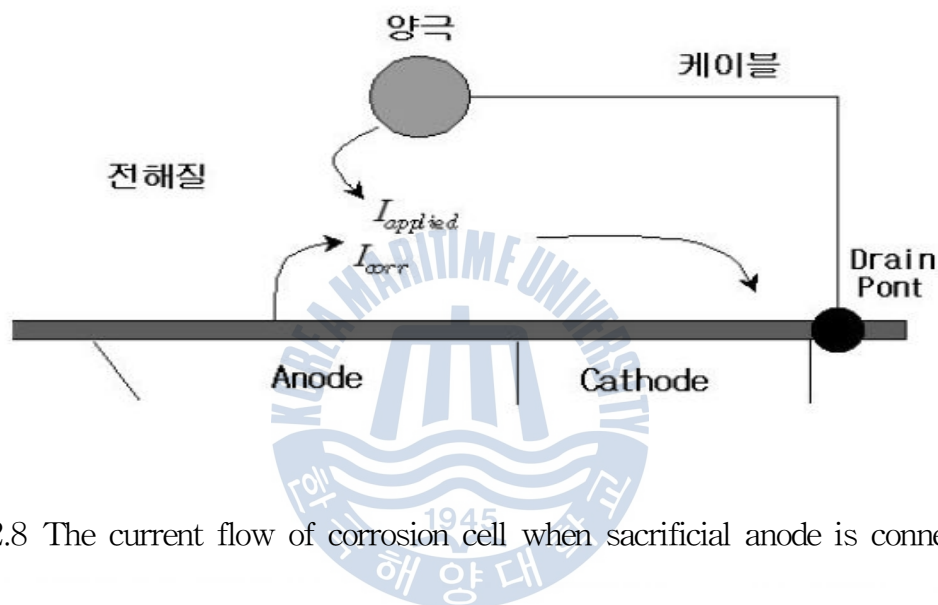


Fig. 2.8 The current flow of corrosion cell when sacrificial anode is connected

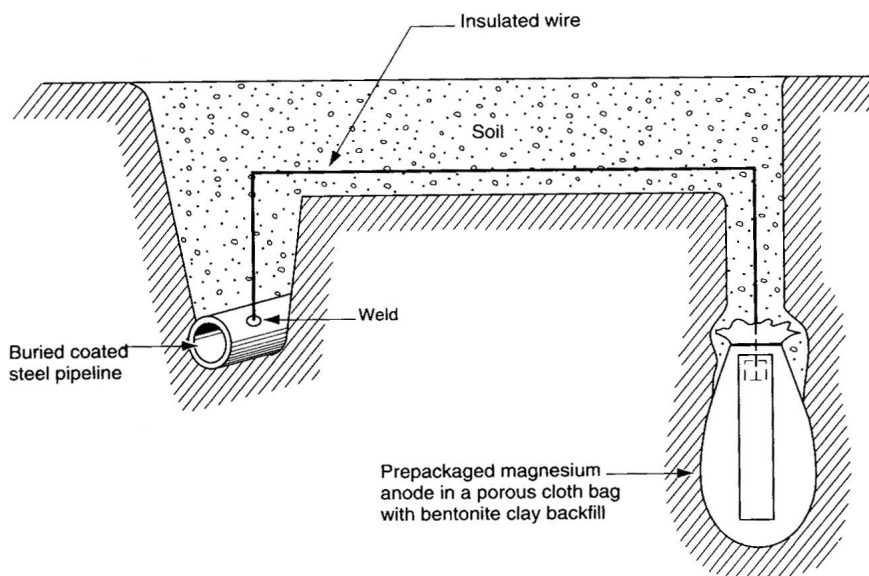


Fig. 2.9 An example of the method using sacrificial anode

각각의 금속들은 일정한 주변 환경에서 각각 다른 평형전위를 나타낸다. 이렇게 전위가 다를 경우를 이용하여 구조물을 방식시키고 희생 양극을 대신 부식시키는 것이 희생 양극법이다.

만약 금속구조물을 토양에 매설하였다고 하면 금속표면에서는 식(2-10)과 같은 금속산화반응과 식(2-11)과 같은 수소환원반응, 식(2-12)과 같은 산소환원반응이 동시에 일어나고 있으며 전체적으로 산화반응속도와 환원반응속도가 같아 외부로 흐르는 전류는 0 인 상태로 금속의 부식이 진행 된다. 이러한 금속에 금속의 전위보다 낮은 다른 금속(양극)을 연결하면 금속구조물은 전위가 높으므로 음극이 되고 다른 금속은 전위가 낮으므로 양극이 된다. 따라서 금속구조물에서는 환원반응이 우세하게 되어 부식반응인 산화반응은 억제되고 양극에서는 양극이 녹아나는 산화반응이 같은 속도로 나타난다.

이러한 희생양극법에서 가장 중요한 것은 금속구조물과 양극으로 사용되는 금속 사이의 전위차이다.



Fig. 2.10 Evans diagram for differential aeration cell

2.3.3. 외부전원법(impressed current cathodic protection)

금속의 표면에서 토양으로 전류가 방출되면 부식이 되고 반대로 토양에서 전류가 금속으로 유입되면 방식이 되는 것이므로 외부전원법은 외부에 양극을 매설하고 정류기를 사용하여 정류기의 (+)극을 양극에 연결하고 (-)극을 금속구조물에 연결하여 정류기에서 강제적으로 전류를 흘려주어 양극을 통하여 흘러나간 전류가 토양을 통하여 음극인 금속구조물로 유입되게 하여 구조물을 방식하는 방법이다. 음극분극을 시키기 위하여 외부에서 전류를 부가시키게 되는데 이때에는 외부의 전원을 공급할 수 있는 정류기(교류전압을 직류전원으로 전환하기 위하여 사용되는 기기)가 필요하며, 상대 양극전극으로는 주로 그라파이트, 고실리콘 주철 혹은 플라티늄 피복, 티타늄 전극 등이 사용된다. Fig. 2.11, Fig. 2.12는 외부전원법의 개념도 및 모형도이다.

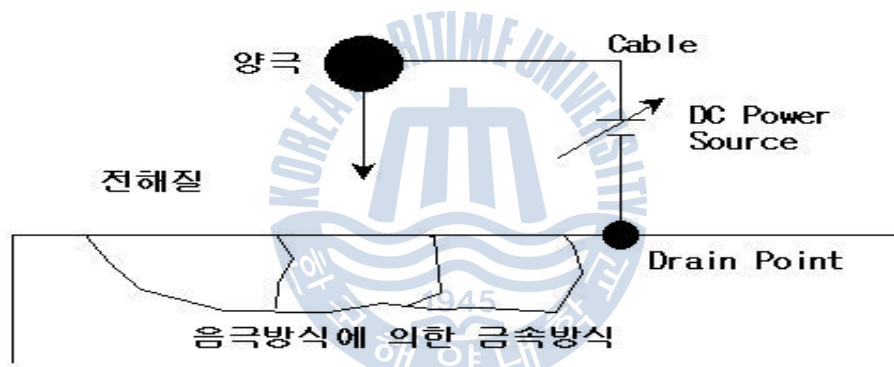


Fig. 2.11 The conceptual diagram of impressed current cathodic protection

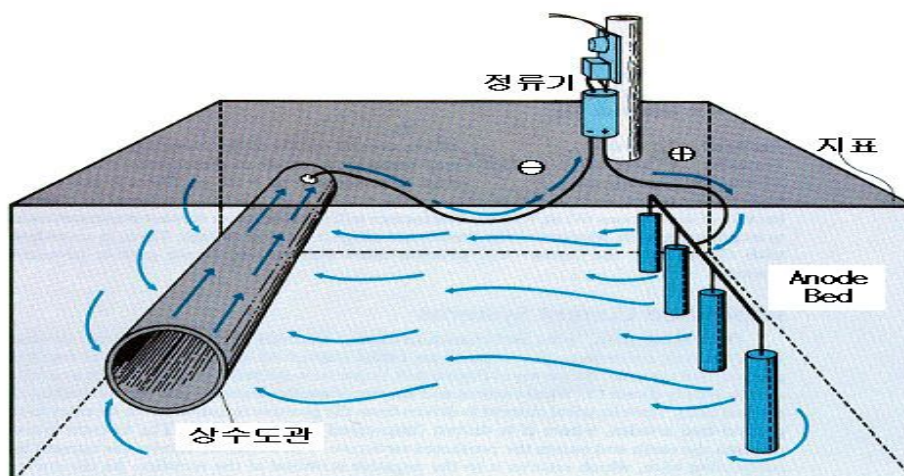


Fig. 2.12 The impressed current cathodic protection method

2.3.4. 외부전원법과 희생양극법 비교

(1) 외부전원법(ICCIP) 장점

- 1) 구조물의 전위를 정류기의 출력을 조정함으로써 낮은 값에서 높은 값까지 변화시킬 수 있다.
- 2) 에너지원이 단지 1개의 정류기로만 사용할 수 있다.
- 3) 양극으로 다양한 종류를 사용할 수 있다.
- 4) 많은 외부전원용 양극들은 매우 적은 소모율을 가지며 작은 크기에서도 큰 전류량을 흐르게 할 수 있다.
- 5) 전기적인 방법으로 제어 및 감시가 가능하다.
- 6) 양극의 수명이 길다.
- 7) 저항이 높은 지역의 방식도 가능하다.
- 8) 넓은 지역을 한 에너지원으로 방식이 가능하다.

(2) 외부전원법(ICCIP) 단점

- 1) 외부전원이 필요하다.
- 2) 정기적인 유지관리가 필요하며 유지비가 소요된다.
- 3) 양극에 연결되는 전선이 부식될 수 있다.
- 4) 양극은 상당히 높은 전위를 유지하므로 이러한 전위가 주변의 다른 구조물에 간섭을 줄 수가 있다.
- 5) 시공이 까다롭고 시공비가 많이 든다.
- 6) 전원공급장치 및 정류기를 관리할 수 있는 전문적 지식이 필요하다.

(3) 희생양극법(SACP) 장점

- 1) 외부의 힘에 의해 파괴될 가능성이 적다.
- 2) 설계수명기간 동안 유지비가 적게 든다.
- 3) 전기와 같은 외부 에너지원이 필요하지 않다.
- 4) 시스템 요소가 적다(간단하다).
- 5) 주변 구조물과 전기적으로 절연되어진 국부적인 구조물을 방식하기에 좋다.
- 6) 작용하는 전위차가 크지 않으므로 주변 구조물에 간섭 영향을 주지 않는다.
- 7) 과방식에 대한 우려가 없다.

- 8) 시공이 간단하고 편리하다.
- 9) 전류분포가 균일하다.
- 10) 유지관리비가 적다.

(4) 희생양극법(SACP) 단점

- 1) 토양비저항이 높은 지역에는 비경제적이다.
- 2) 긴 수명을 요구하는 장소에는 불리하다.
- 3) 계절에 따라 전류출력이 달라진다.
- 4) 산성 환경에서는 양극이 직접적인 환경의 영향으로 수명과 효율이 급격히 떨어진다.
- 5) 설계수명을 길게 하기 위해서는 양극의 양을 많게 해야 한다.
- 6) 용액의 화학조성과 온도에 따라 양극의 전위가 달라진다^[5-7].

2.4 심매법과 천매법

2.4.1. 심매법(deepwell bed method)

심매법은 지표면에서 수직하게 보링(boring)후 홀 내부에 양극을 설치하는 방식으로 약 15~80 m 정도의 깊이에 양극을 설치한다. 이 방법은 양극이 차지하는 면적이 작기 때문에 양극부지로 활용할 수 있는 유효 토지가 거의 없는 상황에서 많이 사용되고 있다. **Fig. 2.13**은 심매 양극 설치 개략도이다.

2.4.2. 천매법(shallow bed method)

천매법은 방식대상물과 100~150 m 이격하여 양극을 2~4 m 깊이에 매설하여 방식전류를 얻는 방식으로 방식전류가 배관전체에 균일하게 분포되고 공사비가 저렴한 장점이 있으나, 양극을 설치할 부지확보가 어렵고 관리가 어렵다는 이유로 제한적으로 적용하고 있다. **Fig. 2.14**는 천매양극 설치 개략도이다^[2].

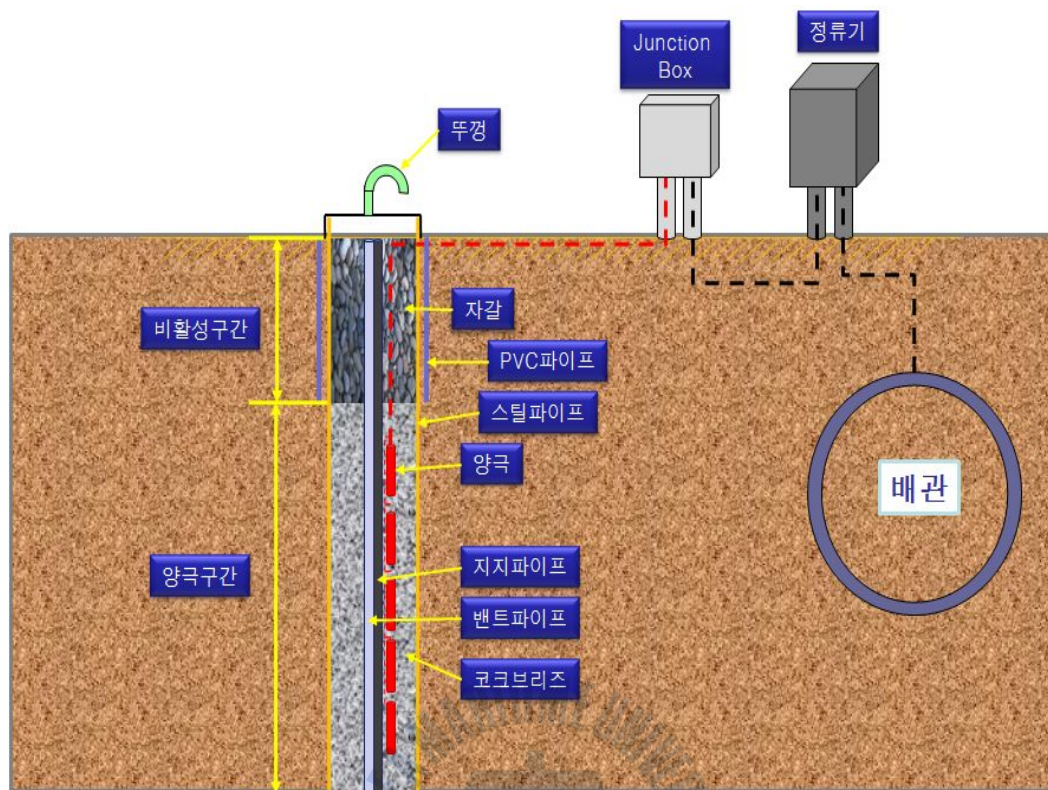


Fig. 2.13 The setting drawing of deepwell anode

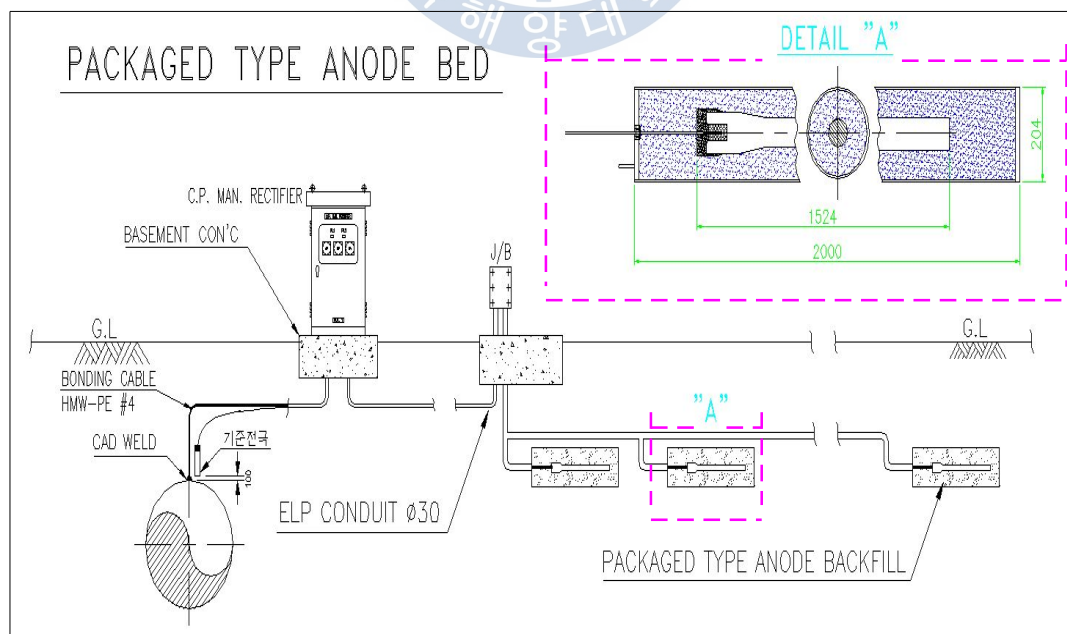


Fig. 2.14 The setting drawing of shallow bed anode

2.4.3. 심매법과 천매법 비교

구 분 방 법	외 부 전 원 식	
	Deep Well방식	Shallow Bed방식
공사방법	특수 장비를 이용하여 지표면에서 약 15~80m 를 보링(boring) 후 여러 개의 양극을 수직 열로 설치	크레인 및 굴삭기를 이용하여 지표면에서 약 2~4m 보링(boring) 양극을 수직 또는 수평 열로 설치
양극 설치방법	현장 시공 (케이싱+양극+코크브리지)	공장제작 (케이싱+양극+코크브리지)일체형
소요부지	부지 확보 용이	넓은 부지 확보 필요
에어벤트 시설	홀 내부 가스 배출을 위한 별도 배관 설치	개별양극으로 별도의 벤트 배관 불 필요
코크브리지 충전	시간경과에 따른 코크브리지 유실로 주기적 점검 및 충전 필요	코크브리지가 유실 우려가 적음
작업환경	보링(boring)시 소음으로 및 민원발생 소지가 큼 코크브리지 비산 등 작업환경 열악	패키지 형으로 작업 환경 우수
경 제 성 작업 기간	불리	우수
유지보수	심도가 깊어 홀 내부 점검 및 유지보수가 곤란 양극의 용량증설 불가 및 부하변경에 적극 대처 불가능	간단한 터파기 만으로도 양극의 교체 등 유지보수 가능 양극의 용량 증설에 적극 대처 가능
과방식문제	방식전위집중으로 과방식 위험이 매우 큼	전위 분산으로 과방식 우려가 없음
투입장비 투입자재	방식 전용 착정기+해머+로드+압축기+PVC관+강관+코크브리지+물+양극지 지파이브+아연도강선+타이밴드 등	굴삭기 또는 오가크레인 1대+ 팩키지 형 양극 1식 굴삭기 임대설치가 용이함

2.5 전기방식 기준

2.5.1. -850 mV/CSE 전위 기준

(1) 개 요

-850 mV/CSE 전위 기준은 충분한 방식이 되고 있다는 가정하에, 전기방식 적용 시 배관(강관)의 전위는 황산동 기준전극(CSE)을 기준으로 -850 mV 이하를 유지해야 한다는 것이다^{[6][9]}. 피복이 된 매설 강구조물의 최소 자연전위가 약 -800 mV 정도라는 데에서 기인한다. 다시 말하면 같은 구조물에서 전체 구조물의 자연전위보다 국부양극의 자연전위가 낮은 전위값이 유지되도록 전기방식을 적용하면 매크로셀(macro-cell)에 의한 부식이 발생되지 않는다. 또한 50 mV는 안전율(safety margin)을 적용한 값이다. 전기방식 적용 시 -850 mV 전위 기준은 아주 오래전부터 그 효용성이 증명되어 왔다.

- 1) 전기방식 적용 시 -850 mV 기준은 매설된 강이나 주철 구조물에 대한 전기방식의 수준을 평가하는 데 가장 널리 이용되고 있는 기준이다.
- 2) 전압강하를 반드시 고려하여야 하는데, 이 전압강하는 전해질, 즉 토양에서 전류의 흐름에 의해 발생되고 일반적으로 전압강하(IR drop)이라고 한다.
- 3) 전압강하는 Anode bed 근처나 미주전류의 영향이 있는 장소에서 특히, 영향이 크고 토양비저항이 높아지면 일반적으로 증가한다.
- 4) 나관이나 피복이 아주 불량한 관에서는 기준전극을 가능한 한 구조물과 가깝게 위치함으로써 전압강하를 감소시킬 수 있다 .
- 5) 피복관의 경우 전압강하는 기준전극의 위치에 따른 IR 전압강하의 변화가 그다지 크지 않다.
- 6) 기준전극의 근접이 어려울 경우에는 , 전류차단법(current interruption), 계단형 전류 감소법(step-wise current reduction), 원거리 대지법(remote earth)등을 사용하여 가능한 한 전압강하(IR drop) 성분이 포함되지 않는 전위를 측정하여야 한다.

전류 차단법은 Fig. 2.17과 같이 전원을 차단하여 전압강하를 계측하는 것이고, 계단식 전류 감소법은 장거리 배관의 경우처럼 다양한 전원이 존재하여 효과적으로 모든 전원을 차단시킬 수 없을 때 특히 효과적으로 이용할 수 있다. Fig 2.15에서는 계단식 전류감소법에 의한 전압강하(IR drop)을 보상하는 방법을 보여주고 있다.

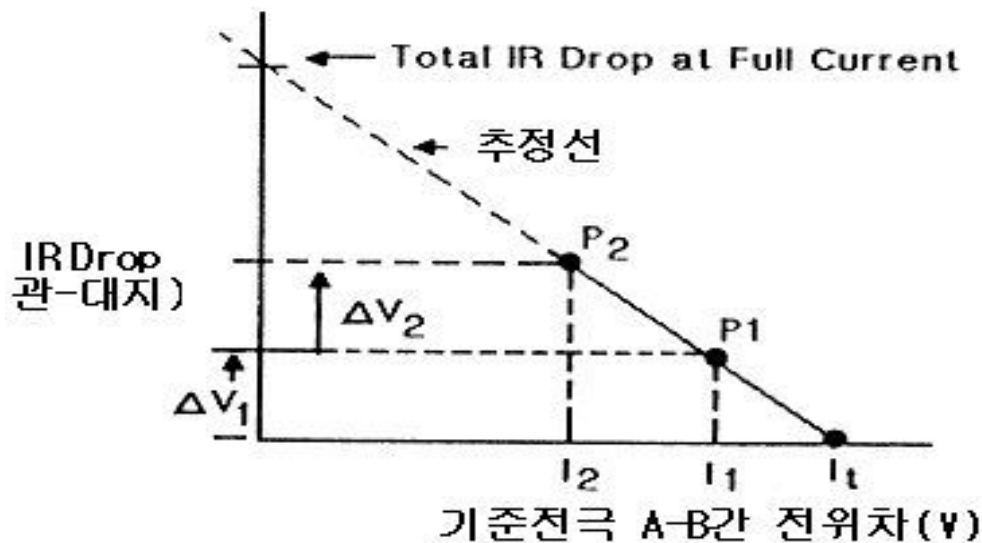


Fig 2.15 IR-drop Compensation by the cascade current-reduction method

(3) 한계성

전기방식 적용 시 -850 mV 기준은 많은 한계성이 있다. IR 전압강하를 최소화하기 위해서는 구조물 직상부 전해질에 기준전극을 위치하여 측정하여야 한다. 즉, 강이나 도로의 횡단구간에서는 구조물 직상부에 기준전극을 위치할 수 없으므로 또 다른 기준이 필요하다. 주로 피복이 양호한 구조물에 적용된다. 피복이 불량하거나 금속이 노출된 구조물에서 이 기준을 적용하면 아주 많은 방식전류가 소요되므로 경제적으로 불리하다.

피복손상, 타 간섭에 의한 영향 등으로 어느 전위 측정지점 사이에서는 -850 mV 보다 (+)한 전위가 발생할 가능성도 배제할 수 없다. 이러한 문제는 CIPS(close interval potential survey)탐측으로 알 수 있는데 만일 CIPS탐측 결과 이러한 문제점이 발견되면 전체 구조물에 대해 전기 방식이 충분히 되도록 보다 (-)한 방식 전위를 인가하여야 한다. 하지만, 보다 (-)한 방식전위를 인가하면 전력손실은 그만큼 증가하게 된다. 그리고 과방식이 되지 않도록 유의하여야 한다. 과방식은 피복손상을 초래하고 강의 수소취성을 증진시킨다. 과방식에 의한 피복손상은 토양의 구성, 수분함량, 온도, 피복형식, 피복의 시공 상태 및 미생물의 존재 여부 등 많은 변수들에 의해 다양하게 나타난다. 과방식에 관해 일반적으로 적용하는 기준은 분극전위로 $-1.05 \sim -1.1 \text{ V/CSE}$ 보다 (-)가 되어서는 안 된다는 것이다. 오래된 강은 보

통 황이나 인과 같은 불순물을 많이 함유하고 있고 처음의 강에 비해 수소에 아주 민감하다. 특히, 오래된 강의 경화부나 용접부의 미세구조는 처음의 강에 비해 수소 취성에 훨씬 민감하다. 위에서 언급한 바와 같이 일반적으로 적용하는 기준은 분극 전위(polarization potential)로 $-1.05 \sim -1.1$ V/CSE보다 (-)가 되어서는 안 된다는 것이다.

전위는 토양에 있는 수분함량에 따라 다양하게 나타난다. 따라서 매년 같은 시기에 연간 탐측을 실시하여 배관의 거동 경향을 분석하여야 한다. 이러한 방법은 탐측한 시기를 제외한 기간에는 전위양상이 다를 수도 있다는 가능성을 배제하지는 못한다.

2.5.2. -850 mV/CSE 분극전위 기준

(1) 개요

CSE 를 기준으로 분극전위가 -850 mV 이하를 유지하여야 한다.

(2) 특징

이 기준에서 전압강하에 의한 손실은 거의 없다고 볼 수 있다. IR 전압강하라고 하는 전압강하 손실은 전기방식 또는 미주전류에 의해 전해질 또는 구조물에서 발생하는 손실이다. 실제로 구조물의 환원반응에 관계되는 전위는 구조물과 전해질의 계면에서의 음극 분극전위이다.

(3) 한계성

가장 중요한 한계성은 모든 직류 전원이 차단될 수 있어야 한다는 것이다. 따라서 모든 정류기, 희생양극 및 본딩 등을 동시에 차단할 수 있는 동기 단속기기가 요구된다. 희생양극법을 적용하는 경우, 양극과 배관은 보통 직결로 연결하기 때문에 전기적으로 차단할 수가 없다. 이러한 경우, 이 기준은 적용할 수 없다.

이 기준은 방식 기준이 아주 엄격한 편이므로 민감한 강(steel)의 경우 부분적으로 과방식에 의해 음극 피복박리나 수소취성과 같은 현상이 발생될 수도 있다.

이 기준에서도 “전기방식 적용시 -850 mV 기준”에서와 마찬가지로 전위 측정 시에는 구조물에서 최대한 가까이에 기준전극을 위치하여야 하고, 측정시간에 따라 전위의 연간 변동이 있으며, 측정위치에 따라 전위변동이 있으며, 한 노선에서 다수의

서로 다른 피복형식일 경우나 지전류(telluric current)가 존재할 경우 또는 박리된 피복박리, 고온의 절연물에 의한 차폐층이 형성된 경우에는 정확한 측정이 어렵다.

2.5.3. 100 mV 분극전위 변화 기준

(1) 개 요

이 기준은 충분한 보호를 위해서 구조물 표면과 전해질에 접촉하고 있는 안정적인 기준전극 간에 음극 분극량이 최소한 100 mV이어야 한다는 것이다.

음극 분극량은 **Fig. 2.16**과 같이 전기방식 시스템을 인가한 직후부터 차단할 때까지 시간에 대한 전위곡선의 형상(formation)과 전기방식 시스템을 차단한 직후의 곡선 형상(decay)을 통해 알 수 있다^[3].

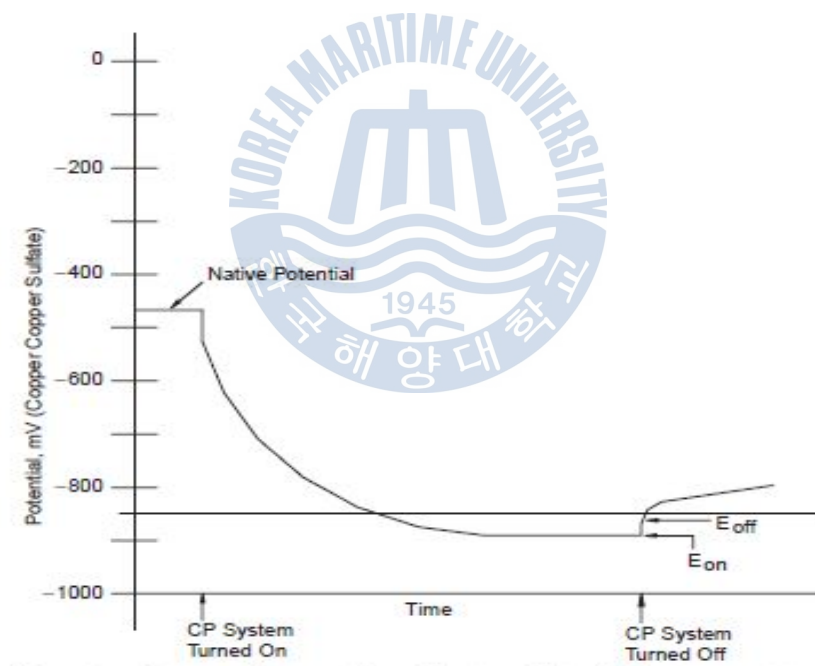


Fig. 2.16 Pipe-to-soil potential as a function of time following energizing CP system

음극 분극량을 측정하는 또 다른 방법은 **Fig. 2.17**과 같이 전기방식 시스템을 차단한 후 발생하는 분극 시간에 대한 전위곡선의 형상(decay)과 전위 변동의 관계를 비교 측정하는 방법이다. 특히, 이 방법은 **Fig. 2.16**의 방법에 비해 측정시간이 비교적 적게 소요되므로 분극량을 평가하는 데 있어 가장 많이 쓰이는 방법이다.

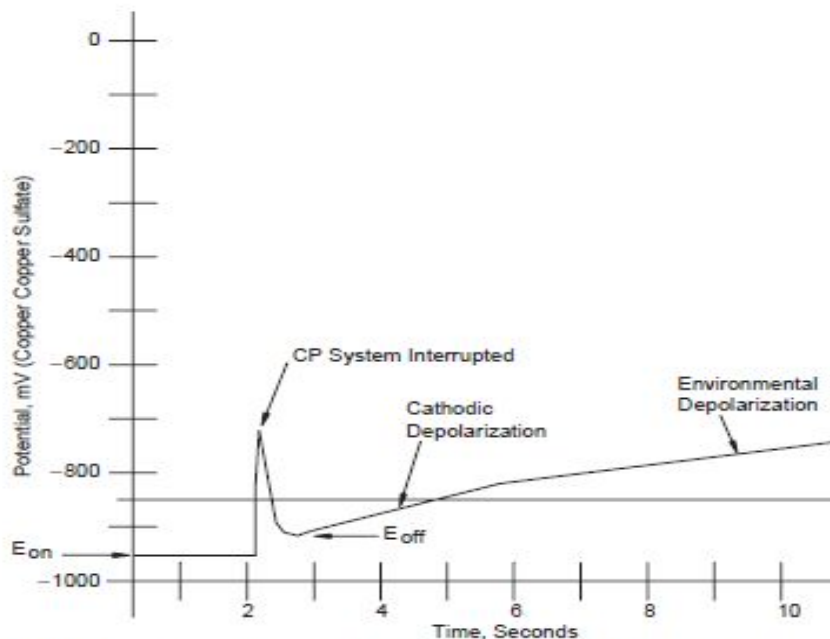


Fig. 2.17 Pipe-to-soil potential as a function of time following de-energizing CP system

(2) 특징

주요 세 가지 기준중 이 기준이 가장 이론적인 근거에 바탕을 두고 있다. 에번스 다이어그램(Evans diagram) 즉 E-logI diagram에서 양극(부식)반응의 기울기는 타펠(Tafel) 기울기와 관계되고 전류의 한 디케이드(decade)당 -100 mV 가 소요되며 구조물의 부식속도는 매 100 mV의 분극량에 대해 1/10 정도 감소한다. 따라서 이 기준은 매설 구조물의 부식속도를 1/10 정도로만 감소시켜도 구조물의 내구성은 여러 측면을 고려할 때 충분하다는 이론에 근거한다.

또한, 음극분극은 산소를 감소시키고, pH를 상승시키며, 금속표면에서 할라이드(halides)를 이동시킴으로써 배관표면에서 보다 부식속도를 감소시킬 수 있는 유용한 환경변화를 촉진시킨다. 이 유용한 환경변화를 환경 분극이라 하며 배관의 자연전위를 (-)의 방향으로 변화시킨다. 따라서 변화된 자연전위에 의한 총 분극량은 환경 분극과 음극분극을 일으키는 요소를 포함한다. 토양에서의 전압강하(IR Drop) 제외한다.

100 mV 분극 기준은 앞에서 언급한 두 가지의 -850 mV/CSE 분극 전위기준을 적용하기에는 너무 많은 노력과 비용이 들어 적용이 곤란하므로 통상 피복이 불량한 배관이나 나관에 주로 적용하면 유리하다.

과방식에 의해 발생하는 피복 박리 및 수소취성 현상을 줄일 수 있다. 이 기준은 오래되고 피복이 불량한 배관에 주로 적용하고 -850 mV/CSE 분극 전위기준은 신설 배관에 주로 적용하면 유리하다. 또한 100 mV 분극기준은 강(steel)은 물론 별도의 전위기준이 없는 다른 금속에도 적용이 가능하다.

③ 한계성

피복이 불량한 배관이나 나관의 분극량을 측정하는 데에는 아주 많은 시간이 소요되고 측정기간 동안 배관은 오랜 기간에 걸쳐 미방식 상태가 된다. 하지만 측정시 분극량이 100 mV 에 다소 못 미치는 경우를 제외하고는 대부분 경우 수 시간 내에 측정이 가능하다.

-850 mV/CSE 전위기준에 비해 측정방법이 다소 까다로우므로 측정비용이 많이 소요된다. 따라서 전력비, 공사비 및 인건비 등을 종합적으로 고려하여 100 mV 분극기준을 적용하여야 한다.

미주전류가 의심되거나 발생하는 개소에는 적용할 수 없다. 왜냐하면 이러한 개소에는 100 mV 분극기준으로는 부식을 방지하기에 그 양이 부족할 뿐만 아니라 정확한 분극량을 측정한다는 것도 사실상 불가능 하다. 정확한 분극량을 측정하기 위해서는 정류기, 희생양극 및 각종 본딩(bonding)등도 차단되어야 한다. 대부분의 경우 오래된 배관에서는 이 기준을 적용하기가 힘들다. 그리고 100 mV 분극기준은 이중 금속배관이 존재하는 개소에는 적용할 수 없다. 왜냐하면 이러한 개소는 100 mV 분극기준으로는 부식을 방지하기에 그 양이 부족하기 때문이다.

또한 높은 pH 등에 의해 발생하는 응력부식이 의심되는 개소에는 이 기준을 적용하기 힘들다. 왜냐하면 응력부식은 자연전위와 -850 mV/CSE사이에서 주로 발생되므로 100 mV 분극기준을 적용하면 균열이 가속되는 범위에 들기 때문이다.

제 3 장 실험방법

3.1. 수치해석

3.1.1 양극을 배관과 수평으로 설치

외부전원식 심매법에서 양극이 피방식체(매설배관)와 나란히 수평으로 설치할 경우를 가정하여 실제 광역상수도 현장 매설배관의 조건과 유사하게 Table 3.1과 같이 임의 변수를 음극방식용 수치해석 프로그램 CATPRO(Elsyca사, Belgium)에 적용하여 양극의 수량에 따라, 양극과 양극간의 이격 거리에 따라 방식전위 분포도를 분석하였다.

- (1) 관로 연장 길이 1 km 구간 중 500 m 지점에서 5 m를 이격하여 양극(1 EA)을 설치 후 5 A의 방식전류를 흘려보낼 때와 관로 연장 길이 1 km 구간 중 300 m, 500 m, 700 m 지점에서 5 m를 이격하여 양극(3 EA)을 설치 후 5 A의 방식전류를 흘려보낼 때 전위 분포도를(방식기준 -850 mV/CSE) 비교 분석하였다.
- (2) 관로 연장 길이 1 km 구간 중 500 m 지점에서 5 m 이격하여 양극(1 EA)을 설치 후 30 A의 방식전류를 흘려보낼 때와 관로 연장 길이 1 km 구간 중 498 m, 500 m, 502 m 지점에서 5 m 이격하여 양극(3 EA)을 설치 후 30 A의 방식전류를 흘려보낼 때 동 구간의 전위 분포도를(방식기준 -850 mV/CSE) 비교 분석하였다.

Table 3.1 Variables related to pipelines used in a numerical analysis

변수	입력값
토양 비저항	8,000 $\Omega \cdot \text{cm}$
강관 피복손상률	3 %
강관 피복손상부 크기	10 cm^2
강관 피복저항	$1 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$
강관의 전기저항	$1 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$
양극 상부절연깊이	15 m
양극 유효깊이	15 m ~ 60 m

3.1.2 양극을 배관과 수직으로 설치

외부전원식 심매법에서 양극이 피방식체(매설배관)와 나란히 수직으로 설치할 경우를 가정하여 실제 광역상수도 현장 매설배관의 조건과 유사하게 Table 3.1과 같이 임의 변수를 음극방식용 수치해석 프로그램 CATPRO(Elsyca사, Belgium)에 적용하여 양극의 수량에 따라, 양극과 양극간의 이격 거리에 따라 방식전위 분포를 얻기 위하여 관로 연장 길이 1 km 구간 중 500 m 지점에서 각각 5 m, 10 m, 20 m, 40 m, 60 m, 100 m 이격하여 양극(1 EA)을 설치 후 30 A의 방식전류를 흘려보낼 때 전위 분포도(방식기준 -850 mV)를 비교 분석하였다.

3.1.3 양극 수평/ 수직 매설 비교

양극을 배관과 수평으로 매설할 경우와 수직으로 매설할 경우 방식전위 경향을 분석하기 위하여 양극 3 홀(각 홀 간 15 m 이격)에 대하여 시험하였다.

3.2 현장 실험

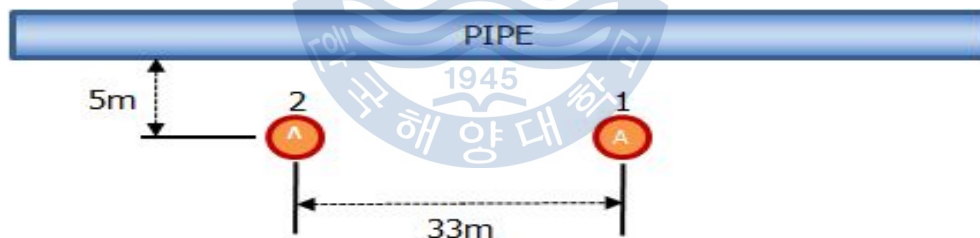
3.2.1 양극을 배관과 수평으로 설치

외부전원법에서 양극이 피방식체(매설배관)와 나란히 수평으로 양극을 설치할 경우 양극 량이 방식에 미치는 영향과 양극간의 이격 거리에 따른 방식 영향에 대한 수치해석 결과 값과 비교 검증하기 위하여 실제로 전기방식 설비를 운영하고 있는 광역상수도 매설관로 현장을 찾아 실험하였다. Fig 3.1은 양극 수평 설치 시험 현장 개략도이다.

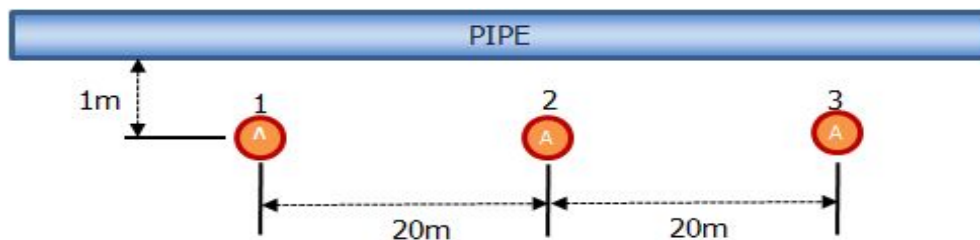


Fig 3.1 The schematic diagram of the test field to install anode beds horizontally

- (1) **Fig 3.2 (a)**와 같이 관로 연장 길이 600 m 구간 중 300 m 지점에서 5 m 이격하여 양극(1 EA)을 설치 후 5.8 A의 방식전류를 흘려보낼 때와 관로 연장 길이 600 m 중 구간 중 약 300 m, 333 m(양극 홀 간격 33 m) 지점에서 5 m 이격하여 양극(2 EA)을 설치 후 5.8 A의 방식전류를 흘려보낼 때 동 구간에 대한 전위 분포도를(방식기준 - 850 mV/CSE) 비교 분석하였다.(1 개의 양극 홀과 2개의 양극 홀의 전위분포 비교)
- (2) **Fig 3.2 (b)**와 같이 관로 연장 길이 600 m 구간 중 300 m 지점에서 1 m 이격하여 양극(1 EA)을 설치 후 1 A의 방식전류를 흘려보낼 때와 관로 연장 길이 600 m 중 구간 중 약 320 m, 340 m(양극 홀 간격 20 m) 지점에서 1 m 이격하여 양극(2~3 EA)을 설치 후 1 A의 방식전류를 흘려보낼 때 동 구간에 대한 전위 분포도를(방식기준 - 850 mV/CSE) 비교 분석하였다.(한 개의 양극 홀과 2개, 3개의 양극 홀 사용의 전위분포 비교)



(a)



(b)

Fig 3.2 Arrangement of pipelines and anode beds

3.2.2 양극을 배관과 수직으로 설치

양극이 매설배관과 수직으로 매설될 경우의 효과를 파악하기 위하여 **Fig 3.3**과 같이 실제로 전기방식을 운영하고 있는 광역상수도 매설관로 현장을 찾아 현장 실험을 하였다. 도로를 따라서 배관이 매설되어 있고 배관에 수직으로 심매 양극 홀이 20 m 간격으로 100 m까지 설치되어 있는 현장 개략도이다.

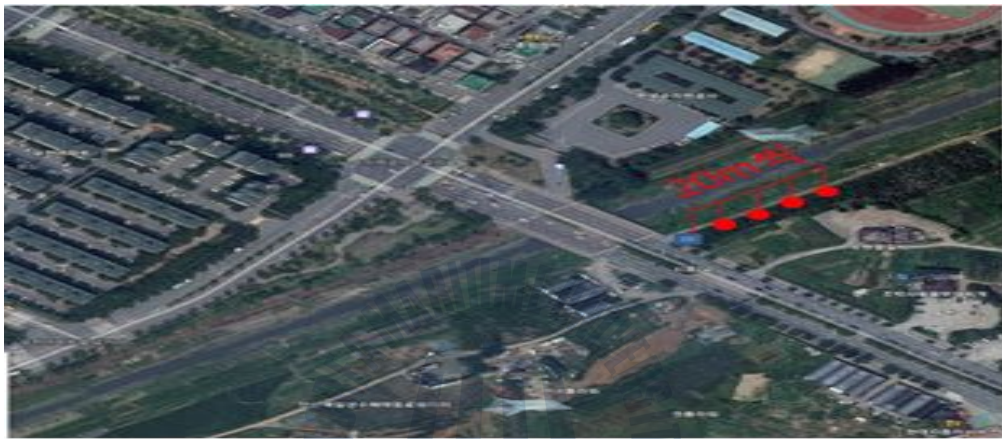


Fig 3.3 The schematic diagram of the test field to install anode beds vertically

제 4 장 실험결과

4.1. 수평 배치 시 방식전위 분석

4.1.1 수치해석(모델링 평가)

Fig 4.1은 길이 1 km 배관의 약 500 m 지점에 수직방향으로 5 m 떨어진 위치에 양극이 존재하고 있는 가정 하에 모델링에 사용한 기본 변수 Table 3.1(실험방법 : 수치해석에 사용된 배관과 관련된 변수)의 조건에서 하나의 양극 홀만을 사용하여 5 A의 출력전류로 방식할 때의 방식전위 분포도이다.

배관 500 m 지점에서의 방식전위는 $-1,150$ mV/CSE를 나타내었고, 방식 전위 기준(-850 mV/CSE)에 만족하는 영역은 양극 홀을 중심으로 주변 약 100 m 구간에 한정되었으며, 나머지 900 m 구간은 기준 방식전위를 만족하지 못하였다.

Fig 4.2는 양극이 1 km 길이의 배관의 길이방향에 300 m, 500 m, 700 m 지점에 존재할 때의 배관의 방식전위 분포도이다.

양극 홀이 설치된 배관 300 m, 500 m, 700 m 지점에서의 방식전위는 $-1,150$ mV/CSE를 나타내었고, 방식 전위기준(-850 mV/CSE)에 만족하는 영역은 각각의 양극 홀을 중심으로 주변 약 100 m 구간에 한정되었으며 나머지 700 m 구간은 방식 기준을 만족하지 못했다.

즉, 각 양극 홀의 전위분포는 동일한 경향을 보이고 방식기준을 만족하는 범위가 양극 홀이 증가한 수량(1 EA \rightarrow 3 EA)만큼 비례적으로 증가(100 m \rightarrow 300 m)함을 알 수 있다.

Fig 4.3은 한 개의 양극 홀(500 m 지점)을 사용하여 30 A로 방식할 경우와 2 m 거리만큼 떨어져 있는 3 개의 양극 홀(498 m, 500 m, 502 m 지점)에서 각 양극 홀 당 10 A씩 30 A로 방식을 할 경우의 방식전위 분포도이다.

1개의 양극 홀을 사용할 경우와 3개의 양극 홀을 사용할 경우의 OFF전위는 차이가 없다. 즉, 심매 양극에서 양극 홀 간의 간격이 작으면 세 양극 홀이 하나의 양극처럼 작용하여 하나의 양극 홀을 사용할 때와 방식전위 분포도는 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

그러나, **Fig 4.4**와 같이 양극 홀 간의 거리를 10 m \rightarrow 25 m \rightarrow 50 m로 증가하면 방식전위분포의 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

하나의 양극 홀을 사용하거나 양극 홀 간의 거리가 작을 때와 비교하면 최대전위와 최소전위의 차이가 작기 때문에 상대적으로 전위분포가 균일하다. 즉, 가능한 양극의 출력을 분산시키고 양극 홀 간 이격 거리를 확보 할수록 방식범위가 넓어지고, 특히 양극 홀의 거리 25 m 지점에서 비교적 균일한 방식전위를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

양극 홀 간 이격 거리가 충분한 경우(50 m 간격) 양극 홀의 개수를 증가시킬 때 (정류기 출력을 5 A → 10 A → 15 A로 증가시킴) 배관의 전위분포는 **Fig 4.5**와 같으며 양극 홀 간 이격 거리가 작은 경우(2 m 간격) 양극 홀의 개수를 증가시킬 때(정류기 출력을 5 A → 10 A → 15 A로 증가시킴) 배관의 전위분포는 **Fig 4.6**과 같다. 양극 홀 간격이 클수록 양극 홀 인근에서는 전위가 균일해짐을 알 수 있다.

Fig. 4.7은 심매 양극에서 배관과 수평으로 양극 홀 이격 거리(5 m, 25 m, 50 m)에 따라 방식전위의 거동을 비교한 결과 양극 홀 간격이 넓을수록 양극 홀 인근에서는 배관의 방식전위는 균일하나 양극에서 멀어지면 방식전위 거동은 거의 유사하게 나타났다. 양극 홀 사이의 이격 거리에 따른 방식 기준을 만족하는 범위 (-850 mV/CSE)는 Table 4.1과 같다. 양극 홀 간 이격 거리 2 m, 25 m, 50 m 일 때의 방식 영향 범위는 230 m, 240 m, 280 m로 큰 차이를 보이지는 않았다. 즉, 심매 양극을 배관과 수평으로 설치하는 경우에 홀 간의 이격 거리는 배관의 방식전위 균일 분포에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Table 4.1 The effect scope of protection according to the separation distance between anode

양극 홀 이격 거리(m)	방식기준이상 범위(m)	비 고
2m	230	
25m	240	
50m	280	

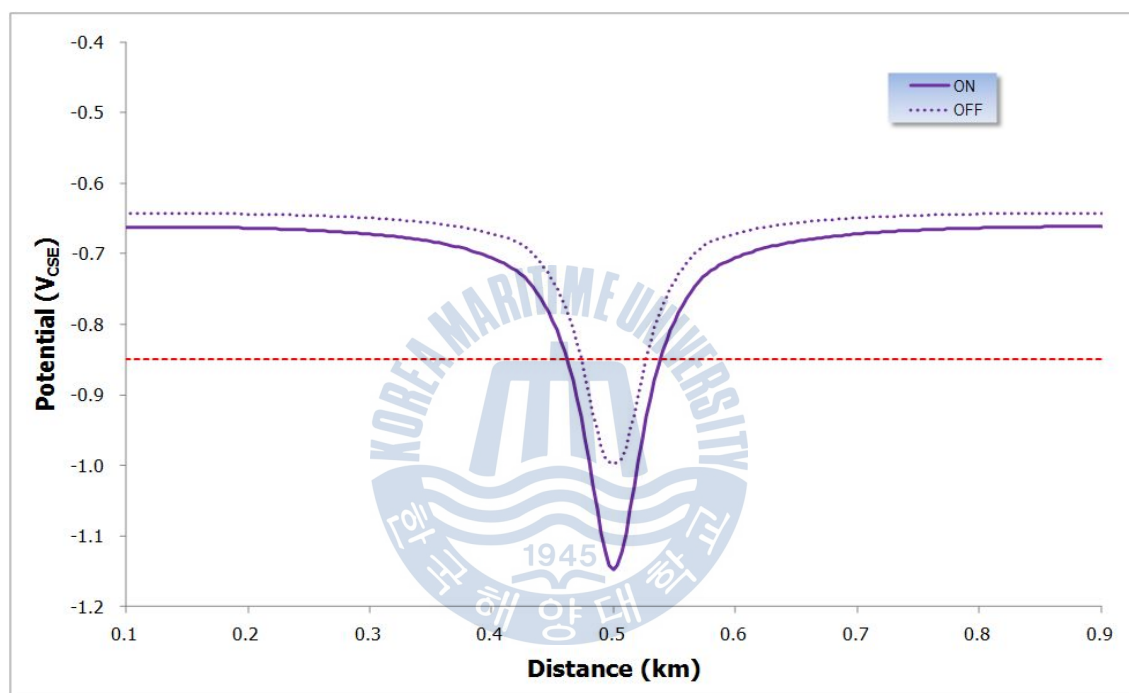


Fig 4.1 Potential in case of CP by a anode hole (Output current: 5A, The distance between pipeline and a anode hole: 5m, resistivity: 8000Ω·cm)

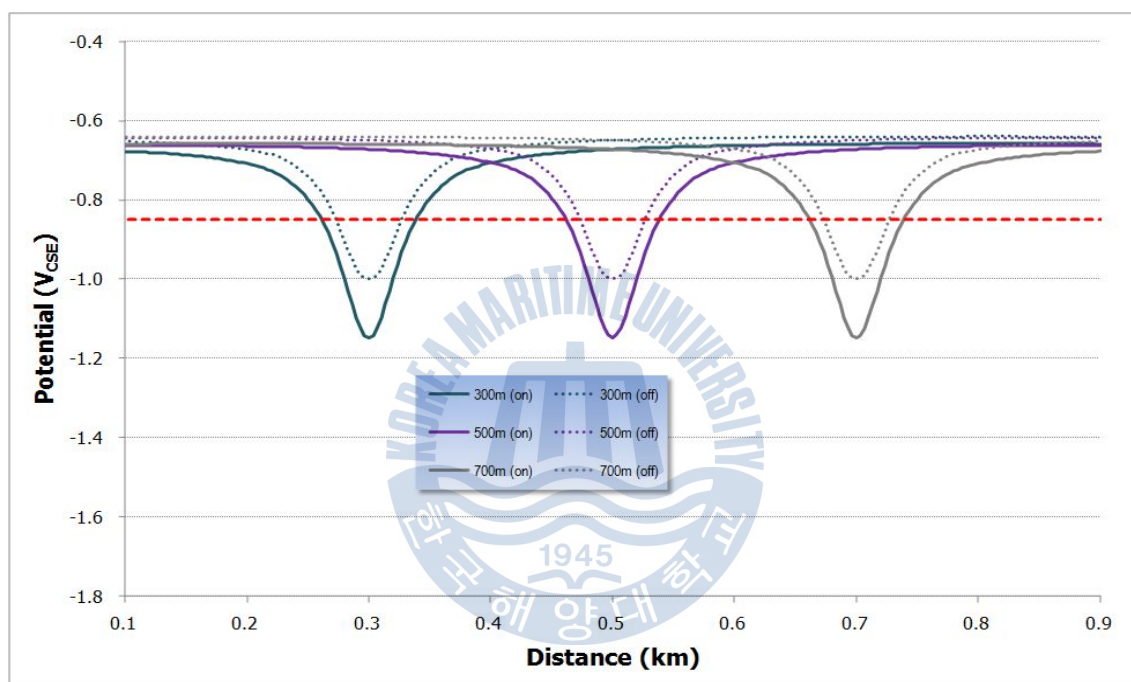


Fig 4.2 Potential in case of CP by three anode holes (Output current: 5A, The distance between a pipeline and a anode bed: 5m, Specific resistance: $8000\Omega \cdot \text{cm}$)

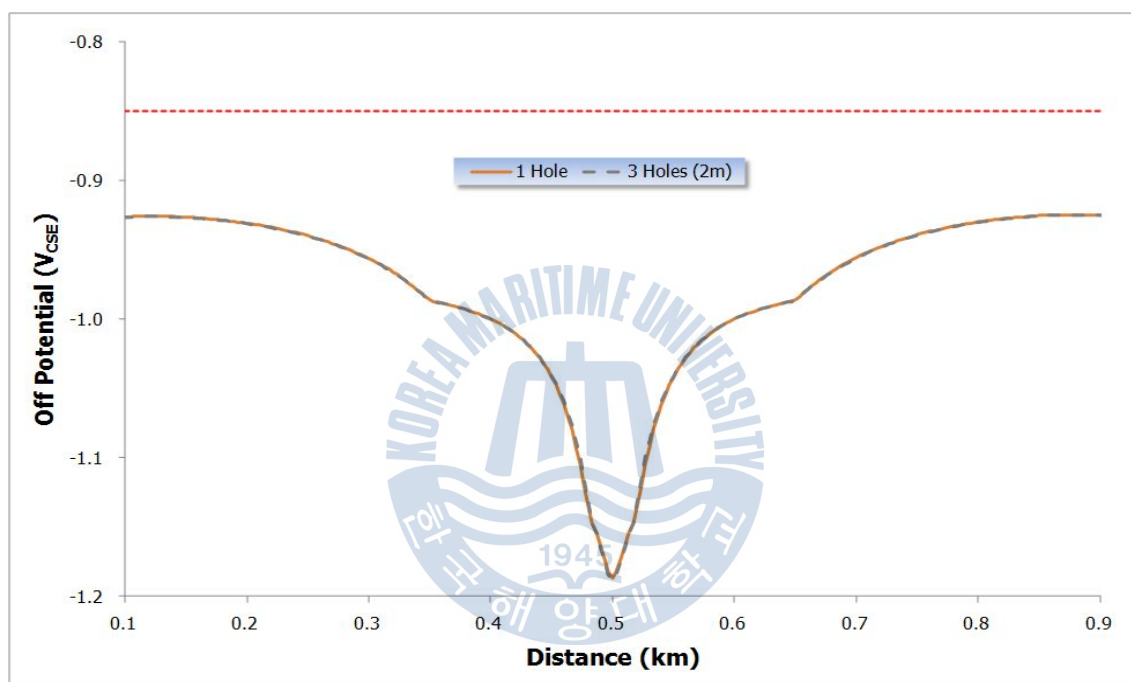


Fig 4.3 The effect of the separation distance of anode holes (Output current: 30A vs. 10A+10A+10A, The distance between a pipe and a positive electrode: 5m, $8000\Omega\cdot\text{cm}$)

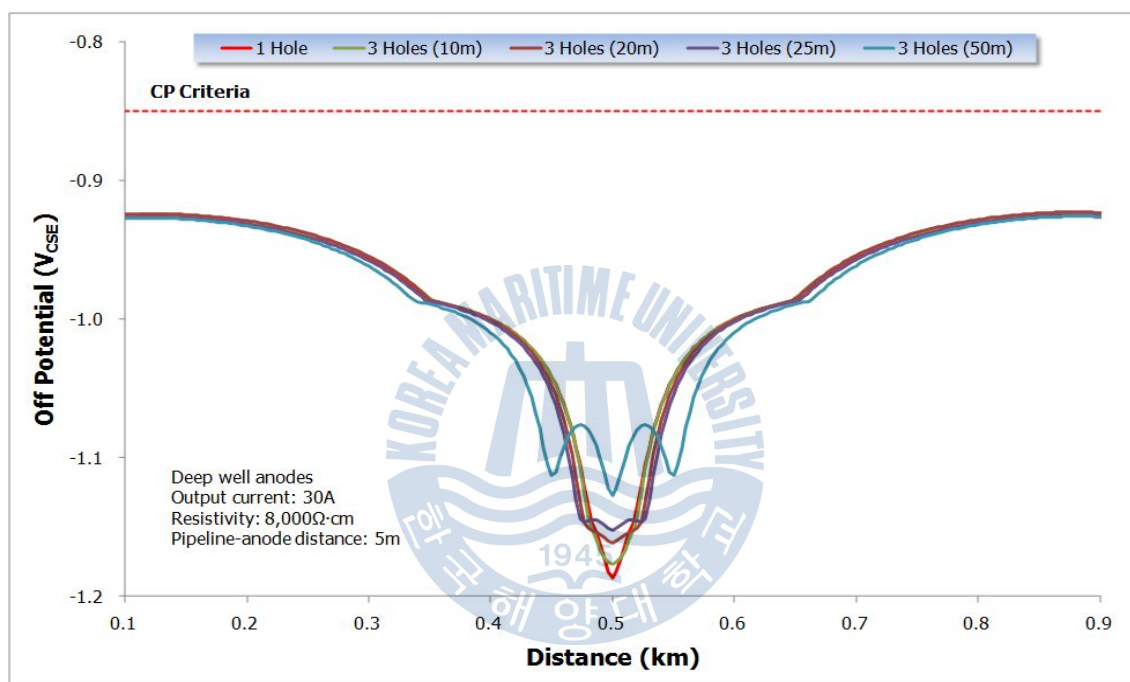


Fig 4.4 The effect of the separation distance of anode holes (The separation distance 10m, 25m, 50m)

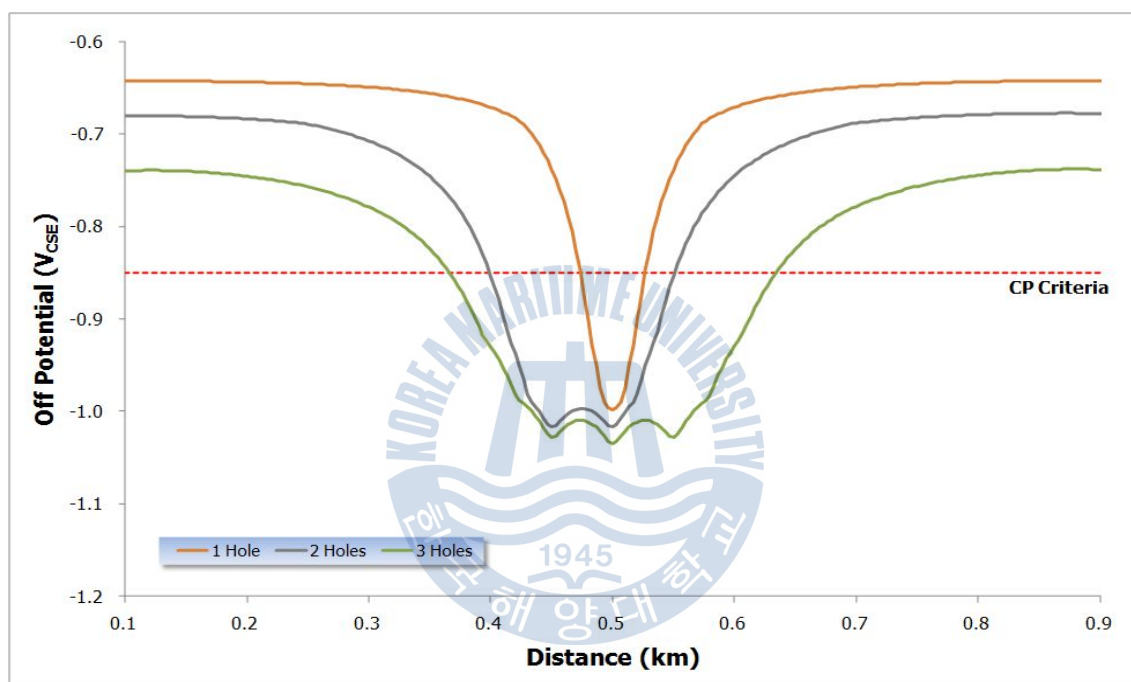


Fig. 4.5 The effect of increase of anode holes (The separation distance 50m, Output of the rectifier 5A→10A→15A)

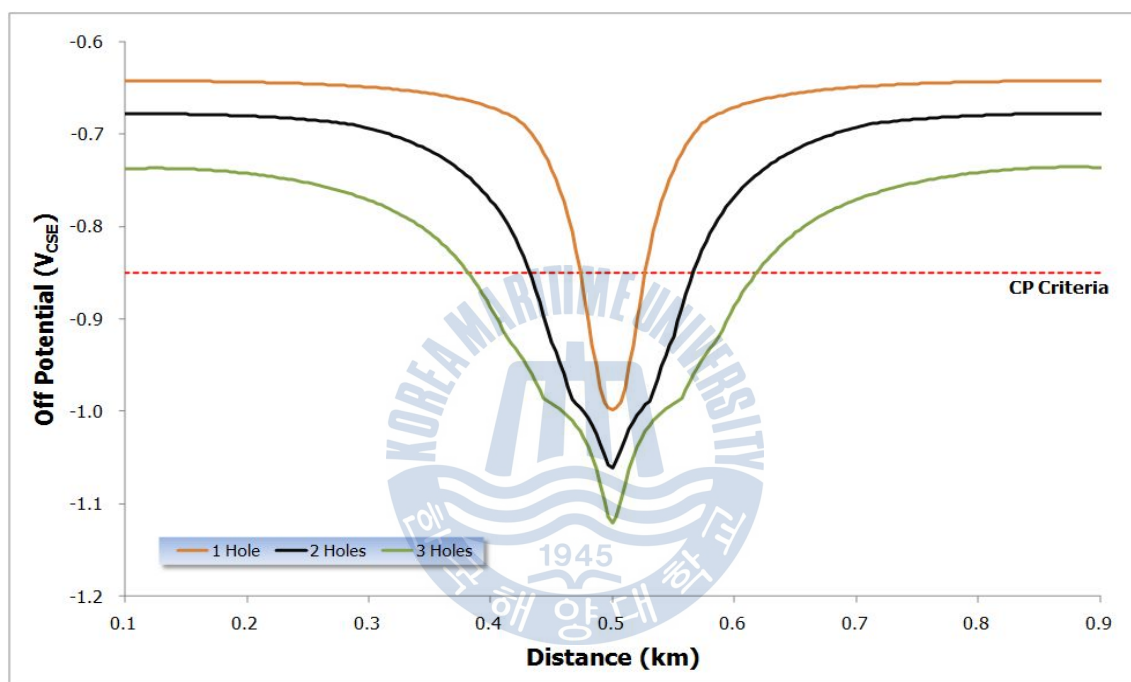


Fig. 4.6 The effect of increase of anode holes (The separation distance 2m, Output of the rectifier 5A→10A→15A)

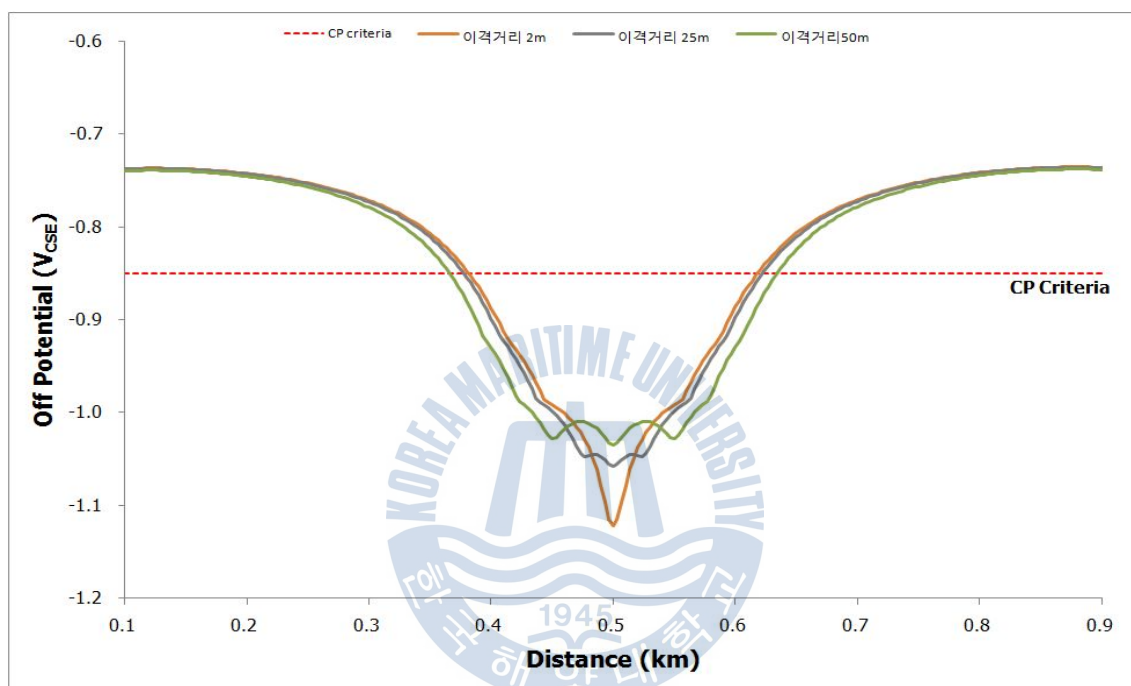


Fig. 4.7 Potential behavior according to the separation distance between anode holes horizontally(3holes, 15A)

4.1.2 현장 실험 결과

배관과 수평으로 5 m 떨어진 양극 1 개의 홀과 홀 간격 33 m의 거리를 둔 2 개의 홀 간의 방식전위를 측정하기 위하여 실제로 전기방식 설비를 운영하고 있는 광역상수도 매설관로 현장을 찾아 실험하였다. Table 4.2, **Fig. 4.8**은 현장에 설치된 정류기를 ON/OFF했을 때 배관의 양극 홀 주변 300 m 구간의 방식전위를 측정한 결과이다.

Table 4.2 Potential distribution according to the number of anode holes

No.	거리 (m)	전위(60 V, 10 A 2 hole)		전위(60 V, 5.8 A 1 hole)	
		ON	OFF	ON	OFF
1	-300	-945	-709	-835	-731
2	-200	-993	-696	-838	-702
3	-100	-1133	-778	-946	-794
4	0	-2336	-1077	-1683	-1039
5	100	-1149	-811	-1005	-800
6	200	-946	-707	-837	-706
7	300	-810	-745	-750	-720

1개의 양극 홀만을 사용할 경우와 2개의 양극 홀을 모두 사용할 경우의 방식전위를 비교하면 ON전위와 OFF전위가 모두 (-)방향으로 이동하였으며, 클램프온미터(clamp-on meter)로 정류기의 출력전류를 측정한 결과 전류는 5.8 A에서 10 A로 증가한 것을 확인하였다.

위의 결과로부터 1 개의 양극 홀에서 출력전류 5.8 A인 경우와 2 개의 양극 홀의 출력전류 5.8 A인 경우의 배관 방식전위 데이터를 계산하였다. 계산한 결과는 Table 4.3, **Fig 4.9**와 같으며 수치해석 결과와 마찬가지로 1 개의 홀과 2 개의 홀이 같은 출력전류를 가질 때 1 개의 양극 홀보다 2 개의 양극 홀의 배관 방식 범위가 약간 좋아지나 두 개 모두 양극 홀에서 약 100 m만 떨어져도 배관의 전위는 거의 유사한 값을 보이고 있다. 심매 양극을 배관과 수평으로 설치하는 경우는 수치해석 결과와 마찬가지로 홀 간의 이격 거리는 배관의 방식전위 균일 분포에 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

Table 4.3 Potential distribution according to the number of anode holes
(Output should be set as 5.8A)

No.	거리 (m)	전위(60 V, 5.8 A 2 hole)		전위(60 V, 5.8 A 1 hole)	
		ON	OFF	ON	OFF
1	-300	-813	-709	-835	-731
2	-200	-822	-696	-838	-702
3	-100	-930	-778	-946	-794
4	0	-1721	-1077	-1683	-1039
5	100	-1016	-811	-1005	-800
6	200	-838	-707	-837	-706
7	300	-775	-745	-750	-720

Table 4.4, Fig. 4.10 에서는 RA-WD-06-01 정류기를 ON/OFF시키면서 양극 홀의 개수를 증가시켰을 때의 양극 홀 주변 300 m구간의 방식전위를 측정한 결과이다.

Table 4.4 Potential distribution according to the number of anode holes(ON-OFF)

NO	거리 (m)	60 V, 4.2 A, 3hole		60 V, 2.7 A, 2 hole		60 V, 1 A, 1 hole	
		ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
1	-300	-795	-684	-765	-691	-692	-660
2	-200	-1062	-845	-1057	-912	-955	-900
3	-100	-2280	-1159	-1694	-1085	-1209	-1007
4	0	-5014	-1434	-3824	-1365	-1840	-1201
5	100	-2160	-1053	-1826	-1026	-1305	-968
6	200	-1330	-1027	-1237	-1018	-1117	-1024
7	300	-873	-705	-816	-691	-765	-723

그림과 같이 양극 홀 개수를 증가시킴에 따라서 ON전위/OFF전위 모두 (-)로 커지고 있으며, ON-OFF 전위차도 증가하고 있다. 출력전류도 1 A → 2.7 A → 4.2 A로 증가하였다.

Table 4.5, Fig 4.11은 일정한 출력전류량(1 A)에서 양극 홀의 개수에 따른 배관 전위를 계산한 것이다. 역시 수치해석 결과와 같이 배관 전위는 양극 홀에서부터 약 100 m 정도 떨어지면 양극 홀 1 개, 2 개, 3 개인 경우 거의 비슷한 전위 값을 보이고 있다.

결론적으로 수평 배치한 홀 간의 이격 거리는 배관의 방식전위 균일 분포에 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

Table 4.5 Potential distribution according to the number of anode holes
(Output should be set as 1.0A.)

NO	거리 (m)	60V, 1 A, 3 hole		60V, 1 A, 2 hole		60V, 1A, 1 hole	
		ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
1	-300	-716	-684	-723	-691	-692	-660
2	-200	-900	-845	-967	-912	-955	-900
3	-100	-1361	-1159	-1287	-1085	-1209	-1007
4	0	-2073	-2004	-3824	-1365	-1840	-1201
5	100	-1390	-1053	-1363	-1026	-1305	-968
6	200	-1120	-1027	-1111	-1018	-1117	-1024
7	300	-747	-705	-733	-691	-765	-723

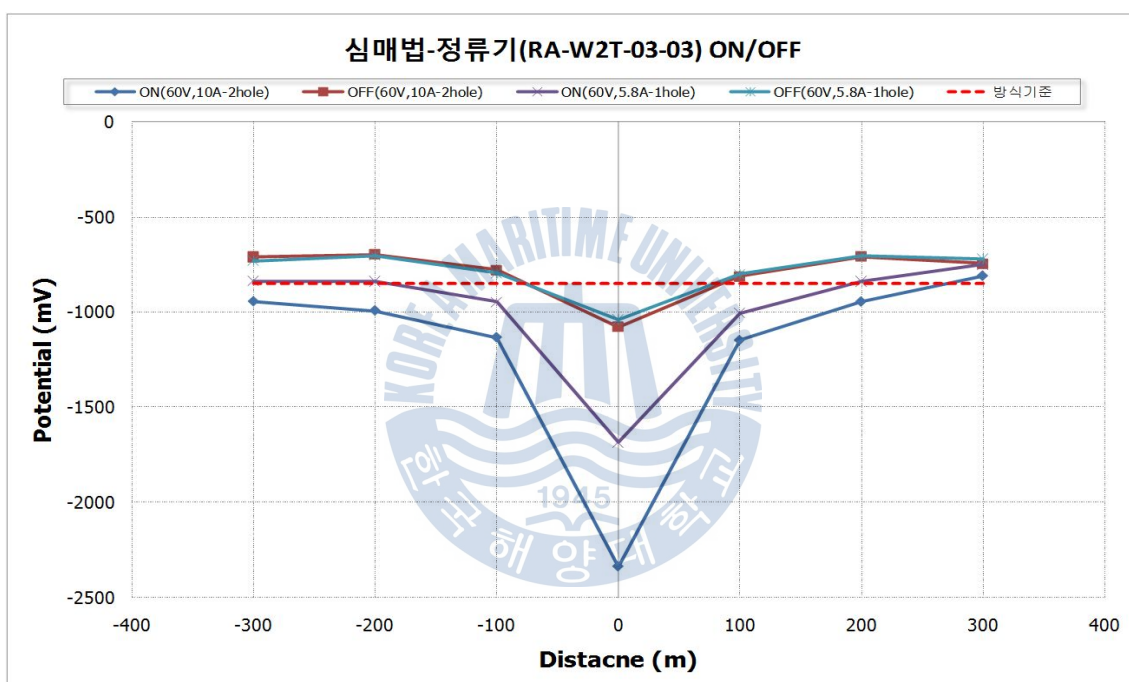


Fig. 4.8 Potential distribution according to the number of anode holes(ON/OFF)

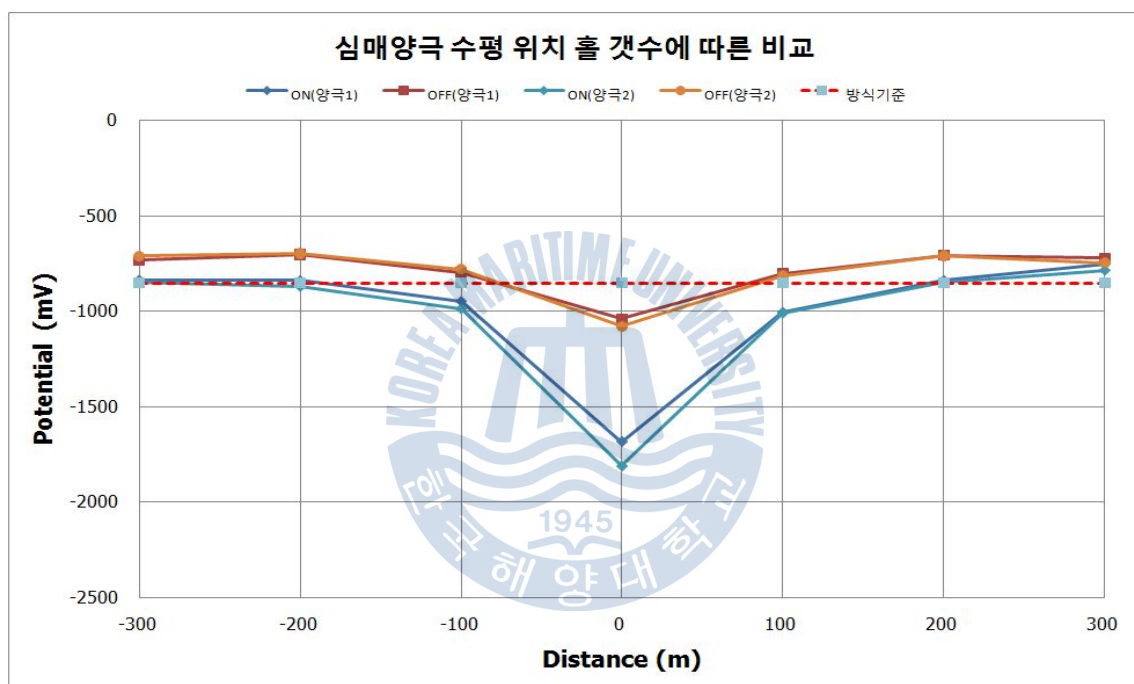


Fig. 4.9 Potential distribution according to the number of anode holes
(Output should be set as 5.8A)

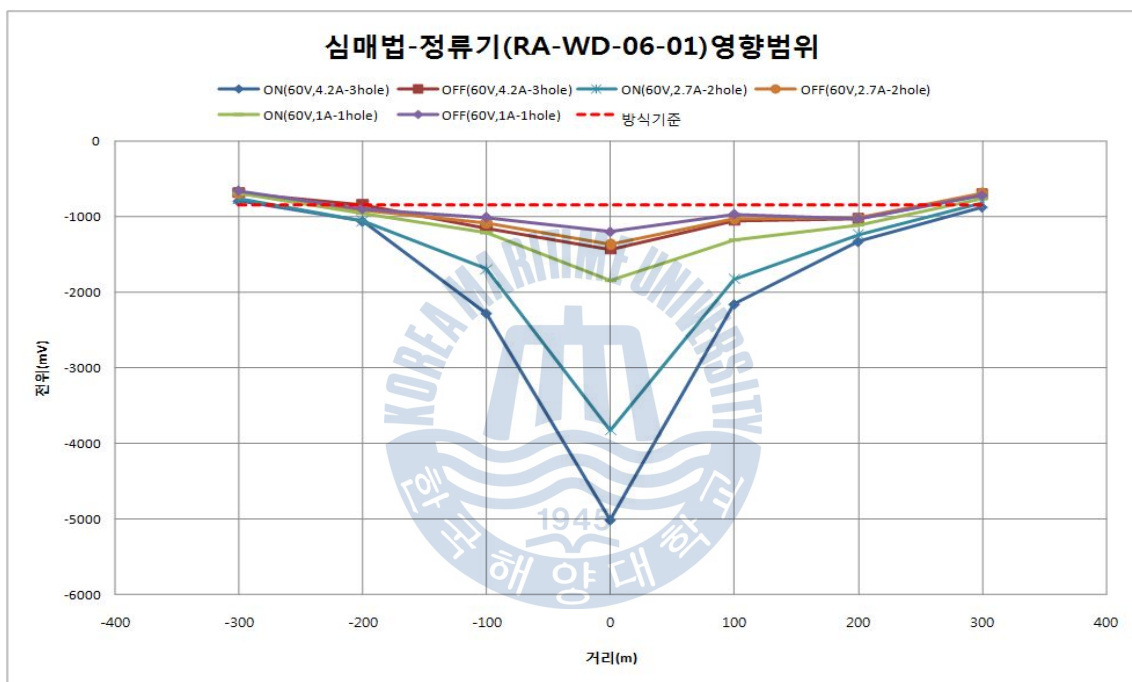


Fig 4.10 Potential distribution according to the number of anode holes (RA-WD-06-01 ON/OFF)

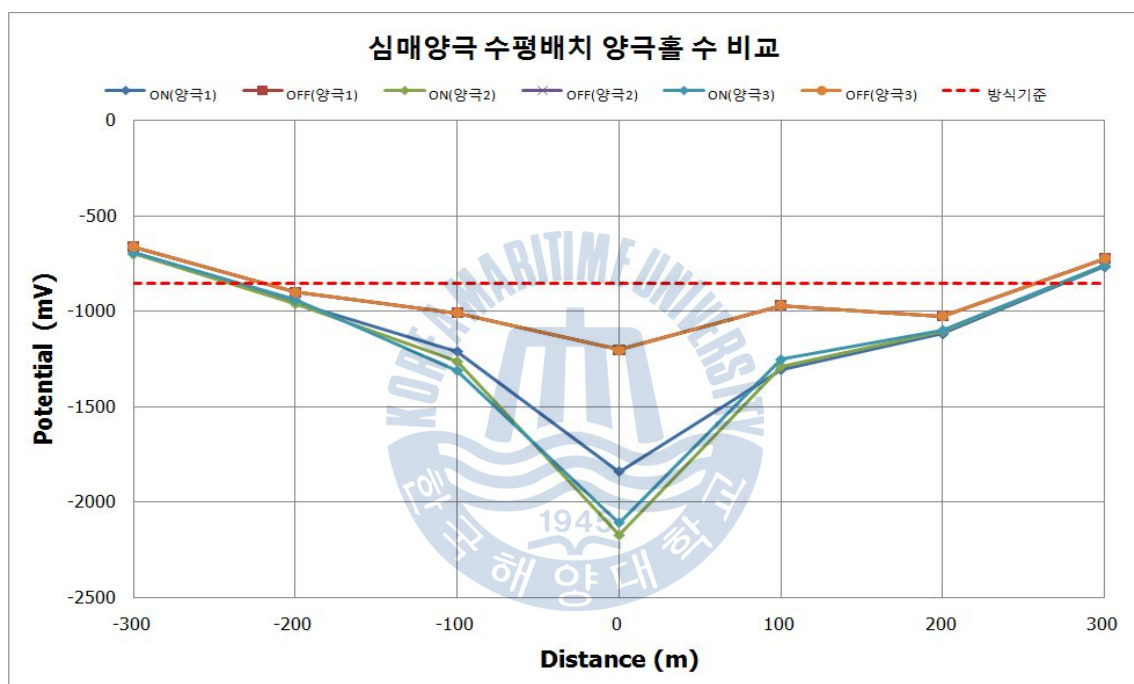


Fig. 4.11 Potential distribution according to the number of anode holes
(Output should be set as 1.0A.)

4.2 수직 배치 시 방식전위 분석

4.2.1 수치해석(모델링 평가)

매설배관과 양극의 수평 설치와 마찬가지로 수치해석을 통해서 양극의 수직 배치에 따른 방식효과를 평가하였다. 수치해석의 기본조건은 수평배치 평가 조건과 동일하게 하였다. **Fig. 4.12**는 양극의 이격 거리를 5 m 에서 100 m까지 수직으로 변화시켰을 때의 방식전위이다.

배관과 양극 홀 간의 수직으로 이격 거리를 증가할수록 배관 전체길이에 걸쳐서 전위분포가 균일하고, 약 40 m 지점부터 이격 거리 대비 방식효과 우수함을 알 수 있다.

4.2.2 현장실험결과

현장실험에서는 **Fig. 4.13**과 같이 5 개의 홀이 존재하는 상태에서 양극 홀 1~5 까지 각각 정류기에 1 개씩 연결하면서 배관으로부터의 수직거리에 따른 방식전위 분포를 측정하였다.

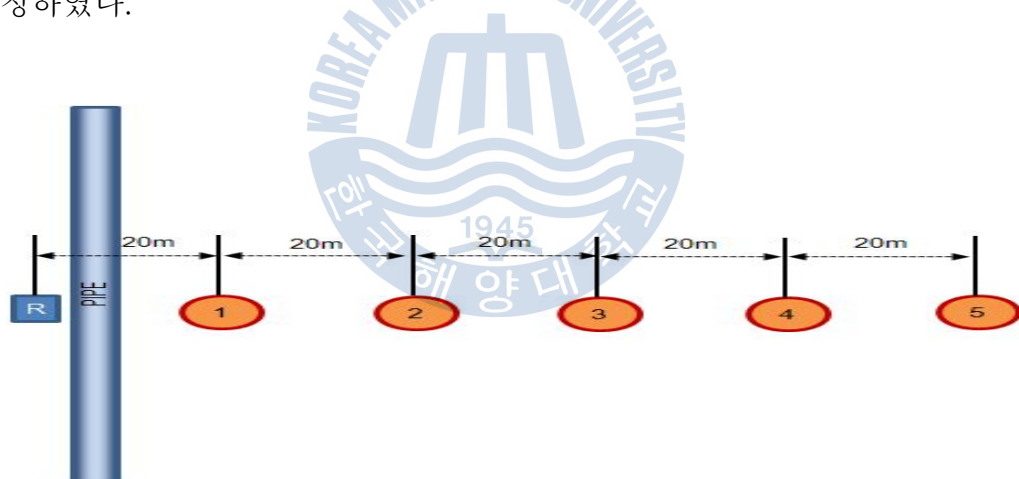


Fig 4.13 Placement of a pipeline, a rectifier, and anode beds

Table 4.4~4.6은 1개소의 양극 홀만 정류기(rectifier)에 연결하여 ON/OFF했을 때 배관의 양극주변 300 m 구간의 전위분포를 나타낸 것이다.

Fig. 4.14에서 알 수 있듯이 배관과 양극의 이격 거리가 증가할수록 양극의 매설지점인 0 m 지점의 최대전위는 (+)방향으로 이동하지만 0 m 지점과 300 m 지점의 전위차이가 감소하고 있다. 즉, 수치해석과 같이 이격 거리가 증가할수록 배관의 전위분포가 상대적으로 균일해진다는 것을 알 수 있다.

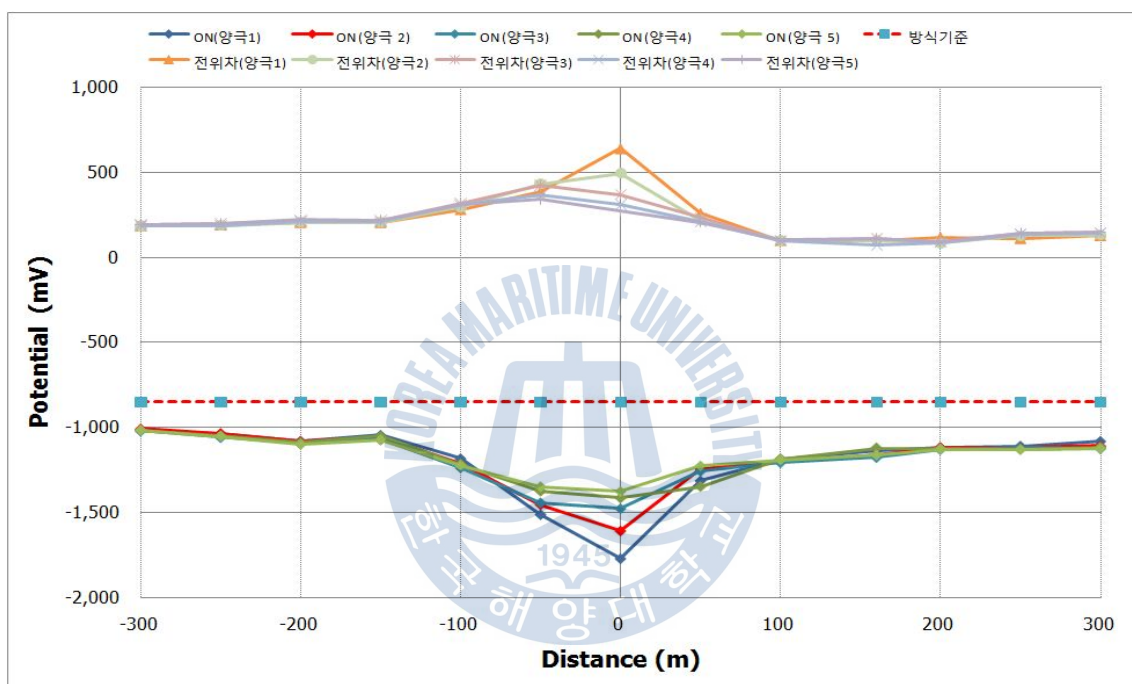


Fig. 4.13 Potential distribution according to the separation distance between pipes and anode beds

Table 4.4 Potential distribution according to the separation distance between pipelines and anode beds

NO	거리 (m)	전위(양극1)			전위(양극2)		
		ON	OFF	전위차	ON	OFF	전위차
1	-300	-1,015	-829	187	-1,008	-823	186
2	-250	-1,038	-847	191	-1,034	-846	188
3	-200	-1,080	-875	206	-1,081	-875	206
4	-150	-1,046	-841	205	-1,054	-848	206
5	-100	-1,183	-901	281	-1,214	-917	296
6	-50	-1,511	-1,005	388	-1,453	-1,020	433
7	0	-1,769	-1,129	641	-1,608	-1,115	494
8	50	-1,313	-763	258	-1,244	-1,025	219
9	100	-1,189	-1,090	99	-1,196	-1,094	102
10	160	-1,137	-1,041	96	-1,163	-1,063	100
11	200	-1,117	-999	118	-1,117	-1,033	84
12	250	-1,109	-998	111	-1,121	-993	128
13	300	-1,081	-953	128	-1,108	-977	132

Table 4.5 Potential distribution according to the separation distance between pipelines and anode beds

NO	거리 (m)	전위(양극3)			전위(양극4)		
		ON	OFF	전위차	ON	OFF	전위차
1	-300	-1,020	-826	195	-1,018	-833	185
2	-250	-1,058	-860	197	-1,050	-862	187
3	-200	-1,095	-879	216	-1,089	-880	210
4	-150	-1,071	-853	217	-1,052	-844	208
5	-100	-1,235	-916	319	-1,215	-907	308
6	-50	-1,441	-1,017	424	-1,375	-1,009	366
7	0	-1,475	-1,106	369	-1,415	-1,104	311
8	50	-1,256	-1,022	234	-1,348	-1,010	211
9	100	-1,206	-1,105	101	-1,185	-1,090	95
10	160	-1,175	-1,065	110	-1,121	-1,049	72
11	200	-1,129	-1,038	91	-1,125	-1,037	88
12	250	-1,120	-979	140	-1,131	-994	138
13	300	-1,123	-977	146	-1,117	-973	144

Table 4.6 Potential distribution according to the separation distance between pipelines and anode beds

NO	거리 (m)	전위(양극5)			전위		
		ON	OFF	전위차	ON	OFF	전위차
1	-300	-1,019	-826	193			
2	-250	-1,053	-858	195			
3	-200	-1,101	-879	222			
4	-150	-1,075	-857	218			
5	-100	-1,224	-915	310			
6	-50	-1,349	-1,008	340			
7	0	-1,377	-1,103	274			
8	50	-1,227	-1,020	207			
9	100	-1,192	-1,089	103			
10	160	-1,163	-1,054	109			
11	200	-1,128	-1,037	92			
12	250	-1,131	-989	143			
13	300	-1,125	-976	149			

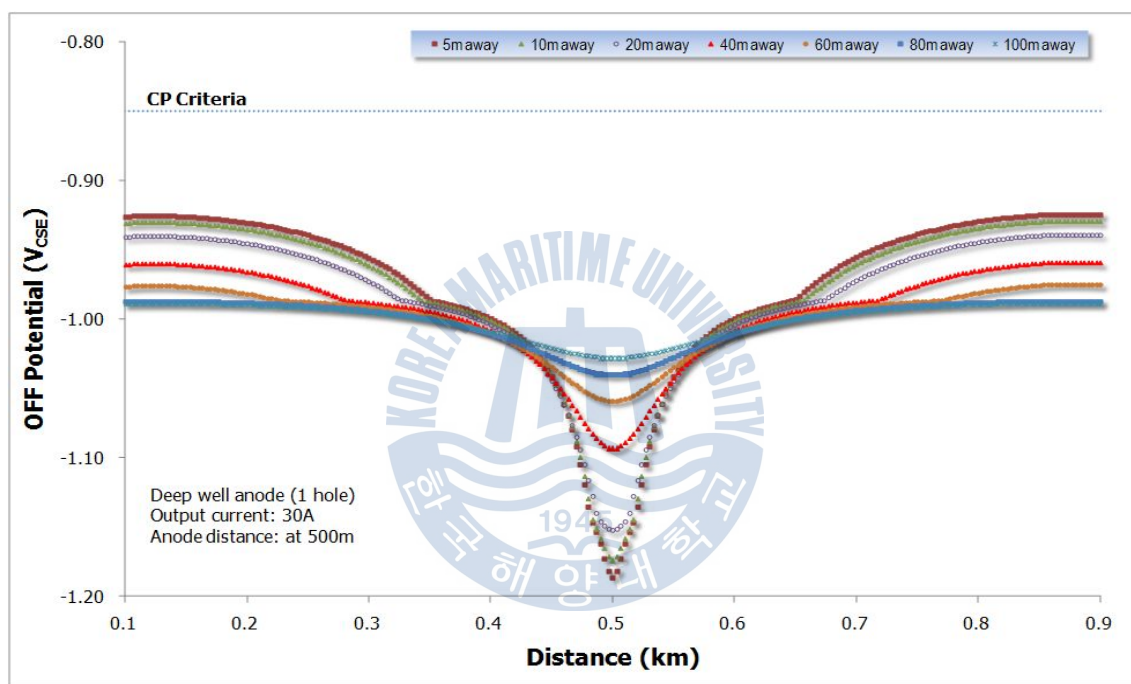


Fig. 4.12 Off potential change according to the vertical separation distance between pipelines and anode beds

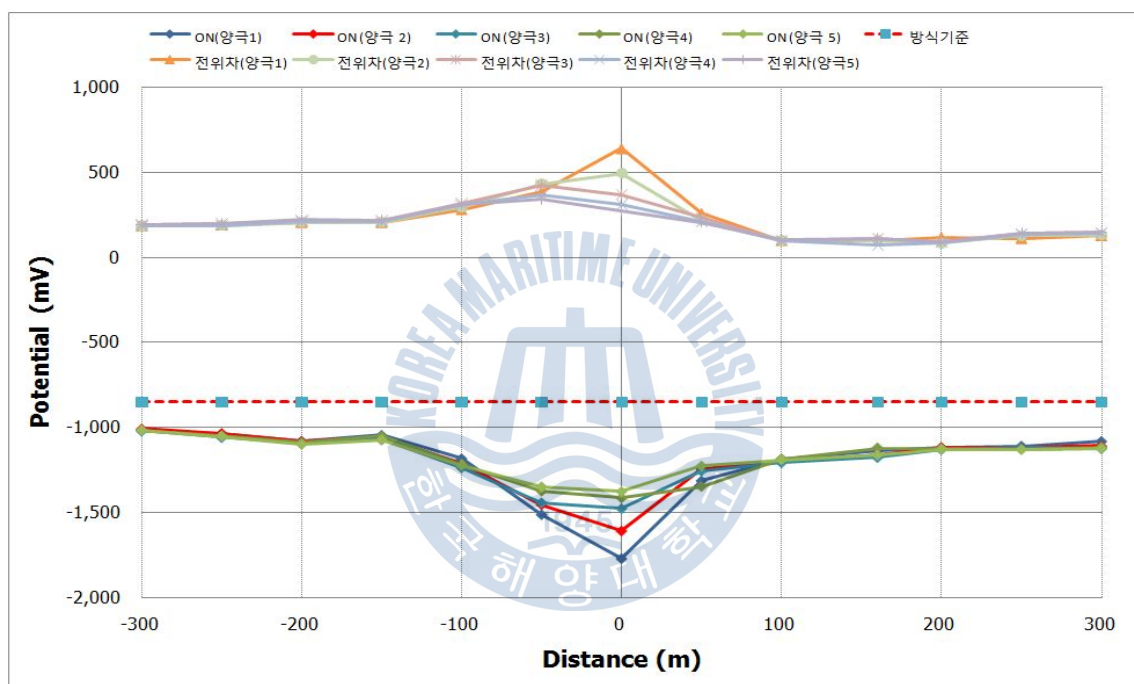


Fig. 4.13 Potential distribution according to the separation distance between pipelines and anode beds

4.3 수평/수직 설치

양극을 배관에 수평으로 매설할 경우와 수직으로 매설할 경우의 방식전위분포를 비교하기 위하여 **Fig 4.14**와 같이 15 m의 이격 거리를 가진 3 개의 양극 홀이 수평으로 매설된 경우와 수직으로 매설된 경우의 전위분포를 모델링하였다.

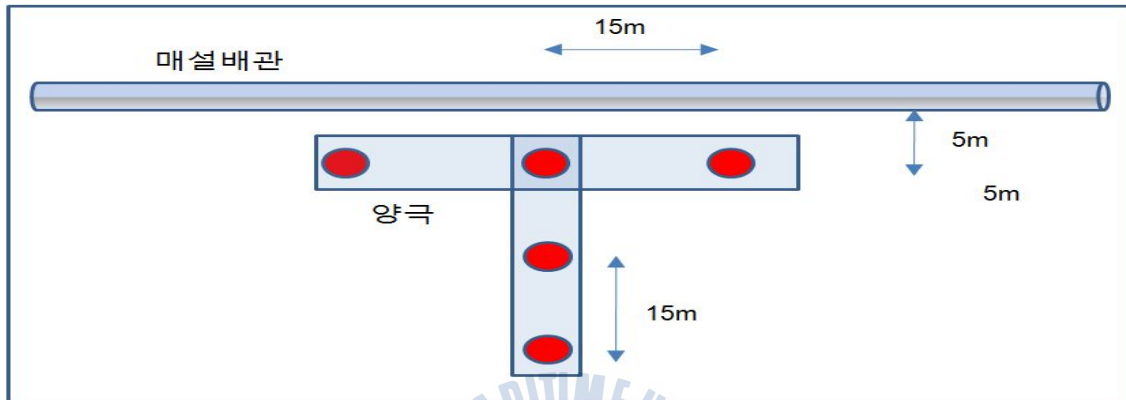


Fig 4.14 The conceptual diagram of vertical/horizontal placement of pipelines and anode beds

Fig. 4.15와 같이 양극을 수직으로 배치했을 경우 수평으로 배치되었을 경우보다 방식전위가 좀 더 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 따라서 양극을 배관과 수직으로 배치하는 것이 효과적이다.

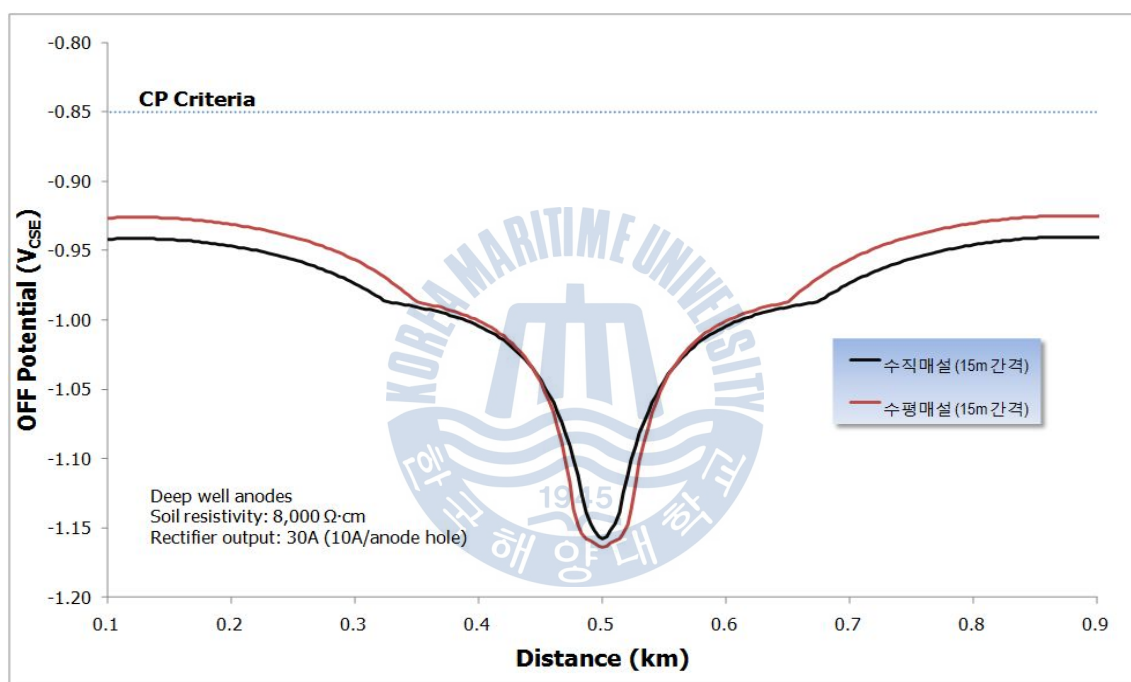


Fig. 4.15 Comparison of vertical/horizontal placement of pipelines and anode beds(Off potentials)

4.3 양극 홀(hole) 간격에 대한 고찰

4.3.1 이론적 고찰

양극 홀 사이의 간격은 양극의 출력 전류량을 결정하는 중요한 변수가 된다. 즉 1 개의 양극 홀을 설치하여 10 A의 출력전류량을 내는 환경에서 2 개의 양극 홀을 서로 멀리 떨어진 지점에 설치하면 2 개의 홀로 20 A의 출력전류를 발생할 수 있다. 통상적으로 심해 양극 1 홀의 저항은 식(4.12)와 같은 Dweight 공식에 의하여 결정 된다.

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{8L}{d} - 1 \right] \text{-----(4.1)}$$

ρ : 토양비저항(Ωcm)

L : 양극 홀(hole)의 길이(cm)

d : 양극 홀(hole)의 직경(cm)

이러한 양극 홀이 여러 개가 있는 경우에는 식(4.2)와 같은 Sunde의 공식에 의하여 양극 홀의 전체 저항이 결정된다.

$$R_n = \frac{\rho}{2\pi N L} \left[\ln \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{s} \ln(0.656N) \right] \text{-----(4.2)}$$

여기서 R_n : N개의 양극 홀 저항

ρ : 토양비저항(Ωcm)

L : 양극 홀의 길이(cm)

d : 양극 홀의 직경(cm)

N : 양극 홀의 개수

s : 양극 홀의 간격(cm)

토양비저항 10,000 Ωcm 을 갖는 환경에서 통상적으로 시행하는 심해 방식인 양극 홀 심도 45 m, 유효 깊이 30 m, 직경 0.2 m인 양극 1 홀의 저항을 구하면 3.23 Ω 이며 만약 같은 규격의 3홀이 아주 멀리 떨어져 있고 3 홀을 한 정류기에 연결하면 3

홀의 양극 홀 저항은 $1/3$ 인 1.076Ω 이 된다. Sunde의 공식에 의하여 양극 홀 사이의 간격을 변화시키면서 계산한 3 홀의 총 저항 및 출력전류비(간격 s 에서의 3 홀의 총 출력전류 / 무한한 간격에서의 3 홀의 총 출력전류)를 계산하면 Table 4.7과 같다. 양극 홀 간격이 5 m이면 3 홀의 총 저항이 2.51Ω 이므로 1 홀의 저항 3.25Ω 의 77 %에 해당한다. 양극 홀의 간격이 커질수록 총 저항은 급격히 작아지는 현상을 보인다. 3 개의 양극 홀이 각각 아주 멀리 있고 3 홀을 한 정류기에 연결한 경우(전선 저항 무시)의 출력전류량과 간격이 s 인 경우의 3 홀의 출력전류량의 비를 살펴보면 간격 5 m에서는 43 %에 불과하며 간격이 커질수록 급격히 증가하는 현상을 보인다. 출력전류량의 비를 보면 초기에는 간격이 멀어질수록 급격히 증가하다가 그 증가세가 서서히 감소함을 알 수 있다. 15 m에서 69 %, 30 m에서 82 %, 60 m에서 90 %가 된다.

현실적인 관점에서 양극 홀 간격이 아주 클 수는 없으며 간격이 크면 전선 포설, 전선 관리 등의 문제점이 따르게 되므로 출력전류비가 82 %가 되는 30 m 간격이 효율적이라 판단된다.

또한, 양극 홀 수량이 증가함에 따라 출력전류비를 계산하면, 4 홀의 경우 80 %의 출력전류비를 위해서는 홀 간격이 40 m 되어야 하며 5 홀에서는 50 m, 6 홀에서는 55 m 각각 되어야 한다. 즉 홀수가 증가할수록 30 m 간격의 양극 홀에서 출력전류비가 감소하게 되므로 가능하면 하나의 정류기에는 3 개의 양극 홀 이상을 설치하지 않는 것이 적절할 것으로 판단된다.

Table 4.7 Change of resistance and the output current rate according to space of anode holes(3holes)

토양비저항(10,000 Ωcm)			토양비저항(20,000 Ωcm)		
간격(m)	3홀 총저항	출력전류비	간격(m)	3홀 총저항	출력전류비
5	2.51	0.43	5	5.03	0.43
10	1.80	0.60	10	3.59	0.60
15	1.56	0.69	15	3.11	0.69
20	1.44	0.75	20	2.87	0.75
25	1.36	0.79	25	2.73	0.79
30	1.32	0.82	30	2.63	0.82
35	1.28	0.84	35	2.56	0.84
40	1.26	0.86	40	2.51	0.86
45	1.24	0.87	45	2.47	0.87
50	1.22	0.88	50	2.44	0.88
55	1.21	0.89	55	2.42	0.89
60	1.20	0.90	60	2.39	0.90
65	1.19	0.91	65	2.37	0.91
70	1.18	0.91	70	2.36	0.91
75	1.17	0.92	75	2.35	0.92
80	1.17	0.92	80	2.33	0.92
85	1.16	0.93	85	2.32	0.93
90	1.16	0.93	90	2.31	0.93
95	1.15	0.93	95	2.31	0.93
100	1.15	0.94	100	2.30	0.94

※ 출력전류비 : 간격S의 총 출력전류량/무한 간격의 총 출력전류

Table 4.8 Change of resistance and the output current rate according to space of anode holes(2 holes)

토양비저항 (10,000 Ωcm)			토양비저항 (20,000 Ωcm)		
간격(m)	2홀 총저항	출력전류비	간격(m)	2홀 총저항	출력전류비
5	2.48	0.65	5	4.96	0.65
10	2.05	0.79	10	4.10	0.79
15	1.90	0.85	15	3.81	0.85
20	1.83	0.88	20	3.66	0.88
25	1.79	0.90	25	3.58	0.90
30	1.76	0.92	30	3.52	0.92
35	1.74	0.93	35	3.48	0.93
40	1.72	0.94	40	3.45	0.94
45	1.71	0.94	45	3.42	0.94
50	1.70	0.95	50	3.40	0.95
55	1.69	0.95	55	3.39	0.95
60	1.69	0.96	60	3.37	0.96
65	1.68	0.96	65	3.36	0.96
70	1.68	0.96	70	3.35	0.96
75	1.67	0.97	75	3.35	0.97
80	1.67	0.97	80	3.34	0.97
85	1.67	0.97	85	3.33	0.97
90	1.66	0.97	90	3.33	0.97
95	1.66	0.97	95	3.32	0.97
100	1.66	0.97	100	3.32	0.97

※ 출력전류비 : 간격S의 총 출력전류량/무한 간격의 총 출력전류

Table 4.9 Change of the output current rate according to space of anode holes

양극 4홀		양극 5홀		양극 6홀	
간격(m)	출력전류비	간격(m)	출력전류비	간격(m)	출력전류비
5	0.34	5	0.30	5	0.27
10	0.51	10	0.46	10	0.43
15	0.61	15	0.56	15	0.53
20	0.68	20	0.63	20	0.60
25	0.72	25	0.68	25	0.65
30	0.76	30	0.72	30	0.69
35	0.79	35	0.75	35	0.72
40	0.81	40	0.77	40	0.75
45	0.83	45	0.79	45	0.77
50	0.84	50	0.81	50	0.79
55	0.85	55	0.82	55	0.80
60	0.86	60	0.84	60	0.82
65	0.87	65	0.85	65	0.83
70	0.88	70	0.86	70	0.84
75	0.89	75	0.87	75	0.85
80	0.89	80	0.87	80	0.86
85	0.90	85	0.88	85	0.86
90	0.90	90	0.88	90	0.87
95	0.91	95	0.89	95	0.88
100	0.91	100	0.90	100	0.88

※ 출력전류비 : 간격S의 총 출력전류량/무한 간격의 총 출력전류

4.3.2 현장 실험(이론식 비교 분석)

양극 홀이 여러 개가 있는 경우 Sunde의 이론식과 현장 시험을 통하여 검정하고자 실제 정류기가 설치되어 있는 양극 홀(hole)에 대하여도 출력 전류량을 측정하여 Table 4.12와 같은 결과를 얻었다.

20 m 간격으로 2 홀 양극의 출력 전류비는 84 %로 이론적인 출력 전류비 88 %와 다소 비슷하였으며, 20 m 간격으로 3 홀의 양극 홀의 출력전류비는 76 %로 이론적인 출력전류비 75 %와 거의 유사하였다.

이와 같이 현장 실험을 통하여 측정한 실험값과 이론값이 거의 비슷한 결과를 얻었으며 다수의 양극 홀 설계 및 시공 시 Sunde의 이론식을 적극 활용하면 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

Table 4.12 The result which measured voltage and current of anode holes

정류기	양극	출력전압 (V)	출력전류 (A)	출력전류비 (%)	이론전류비 (%)	비 고
NO#1	1	18	8.9			
	2	16	8.4			
	1+2	9.61	8.25	84	88	간격 20m
NO#2	1	14.2	7.9			
	2	12.3	8.2			
	3	10.2	7.6			
	1+2+3	10.66	15.98	76	75	간격 20m

제 5 장 결론

음극방식에서 경제적이고 효율적인 방식을 위하여 컴퓨터를 활용한 수치해석과 현장 실험값을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 현장실험 및 수치해석 모델링 결과 양극 홀이 배관과 수평으로 배치할 경우, 홀 간 거리가 가까울 때에는 여러 개의 홀이 상호 간섭 등에 의해서 마치 하나의 양극 홀처럼 작용하여 효율이 저하되므로 양극 홀의 간격은 25m 이상 이격하여 비교적 균일한 전위를 유지할 필요성이 있다.
- (2) 현장실험 및 수치해석 모델링 결과 배관에 수직으로 양극을 매설할 경우에는 상대적으로 방식전위 분포가 균일하였으며, 배관과 최소 40 m 이상 이격하여 방식하는 것이 효과적임을 확인하였다.
- (3) 동일한 양극 홀 간 이격 거리를 가진 3 개의 양극 홀을 수직/수평으로 매설한 경우를 비교한 결과 배관에 수직으로 양극을 설치하는 것이 유리하며, 배관에서 멀리 이격 할수록 방식효율을 높일 수 있었다.
- (4) 다수의 양극 홀 설치 시 현장 실험 및 이론식과 같이 홀 간 간격이 좁으면 상호 간섭이 발생하여 출력 전류량이 줄어들고, 양극 홀 수량이 증가 할수록 효율이 떨어지므로 양극 홀 간의 간격을 최소 30 m 이상 유지해야 하고, 다수의 양극 홀을 설치시는 3 개 홀 이상은 설치하지 않는 것이 적절하다.

참고문헌

- [1] 한국수자원공사 “전기/전자통신공사 설계기준”, 제5장 전기방식설비 설계기준, p24, 2008
- [2] 조남빈, 남호진, 추연길, 고지훈, “상수도관 전기방식 설계 및 시공에 관한 연구” 대한전기학회 논문, pp.1~2
- [3] A.W PEABODY'S "CONTROL OF PIPELINE CORROSION" Edited by RONALD L. BIANCHETTI. pp.22~59, SECOND EDITION 2001
- [4] 윤한봉, 강정은, “매설관로의 부식원인분석 및 부식방지대책에 관한 연구”, p3, 2005
- [5] 한국부식방식협회 “부식방식 하기 강습회 및 표준화 교육교재”, pp.269~272, 2007
- [6] John Morgan "Cathodic Protection Second Edition" National Association of Corrosion Engineers p188, 1987
- [7]. 이의호, 이학렬, 황운석, 김광근 공역, “부식과 방식의 원리” 동화기술출판사, p23, pp54~58, 1996
- [8] Luciano Lazzari, Pietro Pedferri, "Cathodic Protection" polipress, Chapter1. p11
- [9] 한국가스공사 “지하매설배관 방식설비 운영기준”, p.10
- [10] 한국가스공사 “지하매설배관 전기방식설비 설계기준”, p.6

감사의 글

산업현장에서 실무 적용을 위한 학문적 이론이 부족하여 어려움을 겪고 있을 때, 올바른 배움의 길로 인도해 주신 고(故) 김기준 전임 지도교수님과 부족한 논문이 완성되기까지 세심한 검토와 따뜻한 사랑으로 지도해 주신 정진아 지도교수님께 진심으로 감사드립니다.

바쁘신 중에도 논문심사 과정 동안 깊은 관심과 조언, 웃음, 격려를 아끼지 않은 이명훈 교수님, 윤용섭 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

또한, 과정 기간동안 학문적으로 힘들고 어려울 때 많은 도움을 주신 심정환 사장님, 조규상 상무님, 하지명 부장님, 라혜나, 이재범, 최경인, 임관진, 진충국, 경은진 대학원 선후배님께도 감사드립니다.

무엇보다도 제가 오늘 이 자리에 있을 수 있도록 사랑과 헌신으로 보살펴 주신 부모님, 장인,장모님 그리고 성원 해주신 형제자매님들께 감사드리며, 그 누구보다도 많은 고난과 시련속에도 우리 가족을 위하여 열심히 살아가는 소중한 내 아내(李春和) 그리고 사랑스런 아들(承珉), 딸(和廷)과 함께 이 작은 보람을 나누고자 합니다.

돌이켜 보건데, 지난 대학원 생활이 여러가지 핑계로 부족함이 많았음 깨달았습니다.

이제, 이 논문이 끝이 아니라 앞으로 살아갈 새로운 날의 시작임을 다짐하면서, 좀 더 가치있는 삶을 향하여 최선의 노력으로 최고가 되겠습니다. 그동안 저를 위하여 격려해주신 모든 분께 다시한번 짐심으로 감사드립니다.

2013년 12월

추 연 길 올림